

<https://helda.helsinki.fi>

Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa

Holopainen, Markus

2013

Holopainen , M , Hyypä , J & Vastaranta , M 2013 , Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa . Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja , Nro 5 , Helsinki .

<http://hdl.handle.net/10138/42935>

publishedVersion

Downloaded from Helda, University of Helsinki institutional repository.

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint may differ from the original in pagination and typographic detail.

Please cite the original version.

Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5
Publicationer vid Helsingfors universitets institution för skogsvetenskaper 5
University of Helsinki Department of Forest Sciences Publications 5

LASERKEILAUUS METSÄVAROJEN HALLINNASSA

Markus Holopainen, Juha Hyypä ja Mikko Vastaranta

Holopainen, M., Hyypä, J. & Vastaranta, M. 2013. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. Helsingin yliopiston metsätieteiden laitoksen julkaisuja 5: 1–75.

Markus Holopainen (markus.holopainen@helsinki.fi) ja Mikko Vastaranta (mikko.vastaranta@helsinki.fi): Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos.

Juha Hyypä (juha.hyypä@fgi.fi): Geodeettinen laitos.

Julkaisija – Publisher: Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos – *University of Helsinki
Department of Forest Sciences*

ISBN: 978-952-10-4533-2

ISSN: 1799-313X

Kannen kuva: Ville Kankare

Taitto: Kari Minkkinen

Paino: KopioNiini Oy 2013

© Helsingin yliopiston metsätieteiden laitos ja tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat	5
Keskeisiä lyhenteitä	6
1. Johdanto	7

Osa 1 Tekniikka ja menetelmät

2. Laserkeilaustekniikka.....	10
2.1 Lasermittausten historiaa	10
2.2 Lentolaserkeilauksen tekniikka.....	11
2.3 Lentolaserkeilauslaitteisto.....	14
2.4 Lentolaserkeilainten yleisiä ominaisuuksia	17
3. Lentolaserkeilaus metsien inventoinnissa	20
3.1 Lasersäteen ja puuston vuorovaikutus	20
3.2 Yksinpuintulkinta ja aluepohjainen menetelmä.....	21
4. Piirteiden irrotus ja valinta.....	23
4.1 Pintamallit.....	23
4.2 Pintamallien luonti	23
4.3 Pintamallien laatu.....	23
4.4 Piirteiden irrotusyksikkö ja geometriset piirteet	25
4.5 Laserpisteiden korkeusjakaumat	26
4.6 Intensiteetti ja aaltomuoto.....	26
4.7 Piirteiden valinta	26
5. Puusto ja kasvupaikkatunnusten inventointimenetelmät .	27
5.1 Aluepohjainen laserkeilausinventointi	27
5.2 Yksinpuintulkinta.....	27
6. Maastolaserkeilaustekniikka	30
6.1 Yleisesti maastolaserkeilaustekniikasta	30
6.2 Usean keilauksen käyttö puuston koalamittauksessa	31

Osa 2 Sovellukset ja tulevaisuus

7. Maastolaserkeilaus metsävaratiedon tuottamisessa 33

7.1 Puustotunnusten määrittäminen maastolaserkeilauksesta.....	33
7.2 Puiden sijainnin määrittäminen maastolaserkeilauksesta	33
7.3 Läpimitan ja runkokäyrän mittaaminen	35
7.4 Liikkuvan maastolaserkeilauksen mahdollisuuksia	36

8. Metsä- ja leimikkosuunnittelu 37

8.1 Puustotunnusten ennustaminen aluepohjaisella laserkeilausinventoinnilla.....	37
8.2 Puutunnusten ennustaminen yksinpuintulkinnalla	38
8.3 Metsäsuunnittelussa tarvittavan runkolukusarjan muodostaminen	40
8.4 Metsävaratietojen päivittäminen.....	41
8.5 Toimenpiteiden ajoittaminen ja seuranta	41

9. Ekologiset sovellukset 42

9.1 Kasvun ja kasvupaikkatunnusten ennustaminen.....	42
9.2 Puuston biomassan ja metsätuhojen inventointi	43
9.3 Monimuotoisuustunnusten ennustaminen.....	47

10 Laserkeilausinventoinnin tehostaminen 47

10.1 Laserkeilausotanta laajojen alueiden inventoinnissa	47
10.2 Lentolaserkeilauksen yhdistäminen SAR-satelliittitutkakuvaukseen	48
10.3. Lentolaserkeilauksen ja ilmakuvauksen yhdistäminen.....	52

11. Laserkeilausinventoinnin tarkkuuden merkitys metsäsuunnittelulaskennassa 52

11.1. Inventointitiedon arvo.....	52
11.2 Laserkeilausinventoinnin tarkkuuden vaikutus hakkuiden ajoitukseen ja niistä saataviin tuloihin	53
11.3 Puutavaralajien estimoinnin epävarmuus metsäsuunnittelulaskennassa.....	55
11.4 Laserkeilausinventointiin, kasvumalleihin ja puun hintakehitykseen liittyvä epävarmuus metsätaloudellisessa tuottoarvolaskennassa	56

12 Tulevaisuus 59

Lähteet 61

Alkusanat

Viimeisen reilun kymmenen vuoden aikana laserkeilaus on mahdollistanut teknologiaharppauksen yksityiskohtaisessa paikkatiedon hankinnassa. Laserkeilauksen avulla kohteesta voidaan tuottaa geometrisesti tarkkaa 3D/4D (x,y,z,t) –tietoa. Suomi on edelläkävijämaita niin alan tutkimuksessa kuin laserkeilauksen hyödyntämisessä operatiivisessa maanmittauksessa ja metsätaloudessa. Suomi laserkeilataan kokonaisuudessaan lähivuosien aikana: Maanmittauslaitos (MML) vetää laserkeilaukseen perustuvaa valtakunnallista korkeusmallihanketta ja metsäsuunnittelussa ollaan parhaillaan siirtymässä – ensimmäisten maiden joukossa maailmassa – laserkeilaukseen perustuvaan inventointimenetelmään. Tulevaisuudessa parhaillaan tutkimusasteella oleva maastolaserkeilaus avaa uusia mahdollisuuksia entistä yksityiskohtaisemman metsä-, maankäyttö- ja luonnonvaratiedon tuottamiseen. Metsäsuunnitteluinventointien tehostaminen ja entistä tarkemmat korkeusmallit ovat kuitenkin vasta ensimmäinen askel 3D/4D-tiedon hyödyntämisessä metsätieteissä. Seuraavassa vaiheessa tarkentuvan metsävarojen inventointitiedon avulla pyritään tuottamaan lisäarvoa operatiivisessa metsätaloudessa. Käytännössä tämä tarkoittaa yksityiskohtaisen 3D/4D-tiedon täysimääräistä hyödyntämistä metsä- ja leimikkosuunnittelussa, puunkorjuussa, puunhankinnan logistiikassa ja metsien biomassamuutosten seurannassa.

Oppikirjan ensimmäisessä osassa käydään läpi yksityiskohtaisesti lento- ja maastolaserkeilaukseen liittyvät tekniikat sekä menetelmät, joita hyödynnetään yksittäisten puiden sekä metsiköiden mittauksessa ja estimoinnissa. Toisessa osassa tarkastellaan laserkeilauksen metsätaloudellisia ja –tieteellisiä sovelluksia sekä tulevaisuuden näkymiä viimeaikaiseen tutkimustietoon perustuen, keskittyen pohjoismaisiin ja pohjois-amerikkalaisiin tutkimuksiin (boreaaliset havumetsät).

Laserkeilaukseen perustuva 3D/4D-tiedon tuottaminen ja hyödyntäminen on tällä hetkellä merkittävin metsä- ja maankäyttötieteiden rajapinta niin tutkimuksessa kuin operatiivisessa toiminnassa. Se on myös hyvä esimerkki siitä, kuinka tutkimustietoa voidaan siirtää menestyksellisesti operatiiviseen toimintaan. Tähän on päästy organisaatio-, tieteenala- ja maarajat ylittävällä yhteistyöllä. Olkoon myös tämä oppikirja esimerkki tuon yhteistyön tuloksista.

Helsinki, Kirkkonummi ja Victoria, elokuussa 2013

Markus Holopainen

Juha Hyyppä

Mikko Vastaranta

Keskeisiä lyhenteitä

ABA	Area-based approach –Aluepohjainen menetelmä
ALS	Airborne Laser Scanning – Lentolaserkeilaus, ilmalaserkeilaus
CHM	Canopy Height Model – Latvuksen korkeusmalli
CW	Continuous Wave – Jatkuva aaltomuoto
dGPS	differential Global Positioning System – Differentiaali globaali paikannusjärjestelmä
DEM	Digital Elevation Model – Maaston korkeusmalli
DTM	Digital Terrain Model – Maastomalli
DSM	Digital Surface Model – Pintamalli
EuroSDR	European Spatial Data Research
FOV	Field of View – keilauskulma
GPS	Global Positioning System – Yhdysvaltain globaali paikannusjärjestelmä
GNSS	Global Navigation Satellite System – Globaali paikannusjärjestelmä
IMU	Inertial Measurement Unit – 6-ulotteinen mittausjärjestelmä, joka mittaa sensorin asentoa ja paikkaa
INS	Inertial Navigation System – Inertia-paikannusjärjestelmä, kts yllä
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ITD	Individual tree detection –Yksinpuintulkinta
ITC	Individual tree crown approach – Yksinpuintulkinta
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
MLS	Mobile laser scanning – Liikkuva (mobiili) maastolaserkeilaus
NASA	National Aeronautics and Space Administration, US
nDSM	normalized Digital Surface Mode – Normalisoitu pintamalli
PRF	Pulse Repetition Frequency – Pulssintoistotaajuus
TLS	Terrestrial laser scanning – Maastolaserkeilaus, maalaserkeilaus
UAV	Unmanned Aerial Vehicle – Miehittämätön lentoalus
Full Waveform LiDAR	Aaltomuoto-LiDAR
WGS84	World Geodetic System 1984

1. Johdanto

Metsiä inventoidaan laajojen alueiden strategista suunnittelua varten sekä operatiivisen metsä- ja leimikkosuunnittelun tarpeisiin. Suomen valtakunnan metsien inventointi (VMI) on esimerkki strategiseen suunnitteluun tarkoitettua inventoinnista. VMI:n avulla seurataan valtakunnan tasolla mm. metsämaan ja puuston määrän kehitystä, puuston kokonaiskasvun muutoksia, puustoon sitoutuneen biomassan määrää ja metsien hiilitasetta sekä suurien metsäalueiden (esimerkiksi metsäkeskus) hakkuumahdollisuuksia. Strategiseen suunnitteluun tarkoitettussa inventoinnissa tärkeitä on tiedon harhattomuus sekä se, että pienetkin ositteet eivät katoa tiedonkeruussa.

Operatiivisessa metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tavoitteena on metsäalueen hakkuumahdollisuuksien, hakkuukertymän ja toimenpiteiden kartoitus. Kuvioittaisen arvioinnin perusteella laaditaan metsänomistajalle suunnitelma päätöksen tueksi. Metsää kuvaavan tiedon tulee olla kuviotasolla mahdollisimman tarkkaa ja harhattonta, jotta metsänomistaja pystyy tekemään oikeita päätöksiä oikeaan aikaan. Puustotietojen lisäksi metsäsuunnittelussa tarvitaan kasvupaikkojen luokitusta metsikön puuntuotoskyvyn kuvaukseen, metsänkäsitelytoimenpiteiden valintaan sekä suojelu- ja virkistysarvojen määrittämiseen. Metsiköiden puuntuotoskyky on puolestaan yksi ratkaisevista tunnuksista määritettäessä metsäkiinteistön metsätaloudellista tuottoarvoa.

Operatiivista leimikkosuunnittelua tehdään puunhankinnan ohjausta varten, jotta puunostaja saisi haluamia puutavaralajeja oikeaan aikaan. Tällöin tarvitaan yksityiskohdista tietoa leimikon puutavaralajien määristä sekä runkojen laadusta. Operatiivisessa leimikkosuunnittelussa tiedon harhattomuuden vaatimuksesta voidaan jossakin määrin tinkiä, mutta tieto metsäsuunnittelukuvion sisäisestä vaihtelusta mikrokuvio- tai jopa puutasolla olisi arvokasta. Metsäsuunnittelussa hyödynnettävän kuvioittaisen arvioinnin tarkkuus ei ole riittävä leimikkosuunnitteluun tarpeisiin,

vaan se tehdään erillisenä maastoinventointina metsäsuunnitelman kuvioittaisen arvioinnin pohjalta.

Metsiin liittyvää tietoa voidaan kerätä kaukokartoituksen avulla monella tasolla. Kartoitus on mahdollista tehdä koskien yksittäisiä puita, tietyn suuruisia ja muotoisia koealoja, metsikkökuvioita, metsätiloja tai suurempia metsäalueita. Kaukokartoitusta on perinteisesti käytetty apuna sekä kuvioittaisessa arvioinnissa että otantapohjaisessa koeala-arvioinnissa. Uusin teknologia mahdollistaa myös puukohtaiset mittaukset. Kaukokartoitustietoa voidaan käyttää pää- tai lisätietolähteenä metsäsuunnittelun ja metsien inventoinnin lisäksi puunhankinnan strategisessa ja operatiivisessa suunnittelussa, puunkorjuussa ja kuljetuksessa, kiinteistöjen hallinnassa sekä metsänhoitotöiden suunnittelussa ja seurannassa.

Visuaalista ilmakuvatulunkintaa on käytetty metsäsuunnittelun apuvälineenä aina 1940-luvulta lähtien. Automaattisten kuvatulunkintamenetelmien kehittäminen alkoi välittömästi ensimmäisen luonnonvarojen inventointiin tarkoitetun Landsat-satelliitin (1972) laukaisun jälkeen. Optisen alueen satelliittikuvapiirteiden onkin todettu korreloivan kohtuullisesti esimerkiksi maankäyttöä ja puustoa kuvaavien tunnusten kanssa. Kuvapiirteiden ja puustotunnusten välisiä riippuvuussuhteita on hyödynnetty laajojen alueiden metsien inventoinnissa jo pitkään.

Suomessa kehitettiin 1990-luvun alussa kaksi merkittävää menetelmäkokonaisuutta satelliittikuvien, numeeristen paikkatietoaineistojen sekä maastomittausten yhdistämiseen metsävarojen inventoinnissa: 1) ei-parametriseen k:n lähimmän naapurin (k-nn) menetelmään perustuva monilähdeinventointi, jota hyödynnetään VMI:ssä yleistettäessä maastossa mitattujen koealojen tietoja pienalueille (Kilkki & Päivinen 1987, Tokola 1988, Tomppo 1990, 2006), 2) monilähteeseen aputietoon ja kaksivaiheiseen otantaan osituksella perustuva satelliittikuvat metsien inventoinnissa (SMI) ohjelmistokokonaisuus (Poso ym. 1984, Wang ym. 1997, Tuominen ym. 2006). Keskeisenä ideana on, että menetel-

mien avulla voidaan tuottaa luotettavaa metsävaratietoa kustannustehokkaasti pienemmille alueille kuin pelkästään maastomittauksiin perustuvalla koealaotannalla. VMI:n monilähdeinventoinnissa maastossa mitattuja tietoja yleistetään keskiresoluution (Landsat TM) satelliittikuvan pikseleille ei-parametrisella k:n lähimmän naapurin (k-NN) menetelmällä. Käytännössä VMI:n monilähdeinventoinnin tulos on luotettavaa yli 100 ha alueilla (Tokola & Heikkilä 1995).

Huolimatta satelliittikuvien tuomasta merkittävästä lisäarvosta suuralueiden inventoinnissa, operatiivisen metsäsuunnittelun menetelmä säilyi lähes muuttumattomina noin 60 vuotta (1950-luvulta 2010-luvulle), eli ilmakuvatulkintaa hyödynnettiin kuvioiden rajauksessa ja varsinaiset puuston ja kasvupaikkatunnusten mittaukset tehtiin maastossa. Suurimpana syynä tähän on se, ettei satelliittikuvien numeerisella tulkinnalla lukuisista yrityksistä huolimatta ole päästy riittävään kuviotasoon tarkkuuteen. Esimerkiksi keskiresoluution satelliittikuvien tulkinnalla päästään kuviotasolla keskitilavuuden osalta 45–55 % suhteelliseen keskivirheeseen, mikä ei ole riittävä tarkkuus operatiivista metsäsuunnittelua ajatellen (mm. Holopainen & Lukkarinen 1994, Hyypä & Hyypä 1999).

1990-luvun alkupuolelta lähtien on kehitetty menetelmiä numeeristen ilmakuvien hyödyntämiseen metsien inventoinnissa. Alkuvaiheessa keskityttiin koeala- ja kuviotasoon piirrepohjaiseen ilmakuvatulkintaan, myöhemmin puutason 2D- ja 3D-menetelmiin. Tavoitteena on ollut siirtyä operatiivisessa metsäsuunnittelussa visuaalisesta kuvatulkinnasta automaattiseen tai puoliautomaattiseen tulkintaan tai kuvamittaukseen joko kuvio- tai puutasolla. Piirrepohjaista metsävarojen ilmakuvatulkintaa ovat Suomessa kehittäneet mm. Holopainen (1998), Anttila (2002), Pekkarinen (2004), Tuominen (2006), Hyvönen (2007) sekä Packalén (2009). Ilmakuvien avulla on tulkittu koeala- tai kuviotasolla puustoon ja kasvupaikkaan liittyviä tunnuksia sekä niihin liittyviä muutoksia. Ilmakuvatulkinnan ongelmiana ovat olleet keskusprojektiivisuudesta

ja alhaisesta kuvauskorkeudesta aiheutuvat radiometriset erot kuvien sisällä ja välillä. Radiometristen ongelmien vähentäminen onkin ollut keskeinen tutkimusaihe piirrepohjaisten ilmakuvamenetelmien hyödyntämisessä (mm. Holopainen 1998, Tuominen 2006). Siirtymisen skannatuista negatiiveista digitaalisten mittakameroiden käyttöön on viime vuosina vähentänyt ilmakuvien radiometrisia ongelmia.

Numeeristen ilmakuvien sävy- ja tekstuuripiirteisiin perustuneen koeala- ja kuviotasoon tulkinnan rinnalla 1990-luvun loppupuolella alettiin kehittää yksittäisten puiden mittaamiseen perustuvia menetelmiä. Alkuvaiheessa yksinpuinmittaus tapahtui 2D-tulkintana (mm. Dralle & Rudemo 1996, Uutera ym. 1998, Pitkänen 2001). Ideana oli hakea sävyarvomaksimien kautta yksittäisten puiden paikat ilmakuvilta, jonka jälkeen automaattisella segmentoinnilla määritettiin latvusten koko ja ilmakuvapiirteiden avulla puulaji. Latvuksen kokoon ja puulajiin perustuen voidaan allometristen mallien avulla mallintaa puun läpimittaa, jota kautta päästään kiinni koealan tai kuvion runkolukusarjaan (Kalliovirta ja Tokola 2005). Ilman puiden pituustietoa allometristen mallien virhe on kuitenkin niin suuri, että 2D-tulkinnan tarkkuus ei ole riittävä operatiivista metsäsuunnittelua ajatellen.

Yhteenvetona niin piirrepohjaisista ilmakuvamenetelmistä kuin 2D-menetelmistä voidaan sanoa, että kuvatulkinnan tarkkuuden on todettu olevan keskiresoluution satelliittikuvia parempaa, mutta kuitenkin selvästi perinteistä maastossa suoritettavaa kuvioittaista arviointia huonompaa. Samaan ja jopa hieman parempaan tarkkuustasoon numeeristen ilmakuvien piirrepohjaisen tulkinnan kanssa on nykyisin mahdollista päästä myös erittäin korkean resoluution tutkasatelliittikuvien avulla (Tokola ym. 2007, Holopainen ym. 2010f, Karjalainen ym. 2012, Vastaranta ym. 2013b), joiden etuna on niiden temporaalinen resoluutio, eli saatavuus kaikissa kuvausolosuhteissa.

Hyypä & Hyypä (1999) vertasivat lähes kaikkia metsien inventointiin tuolloin käytössä olleita kaukokartoitusaineistoja samalla tutkimusalueella ja totesivat, että ainoastaan

3D-menetelmillä voidaan päästä operatiivisen metsäsuunnittelun vaatimalle tarkkuustasolle. 3D-tietoa voidaan tuottaa ilmakuvien avulla automaattisesti digitaaliseen fotogrammetriaan perustuen. Metsien mittauksessa yhtenä 3D-mittausten pioneirina voidaan pitää Ilkka Korpelaa, joka kehitti väitöskirjassaan (2004) digitaaliseen fotogrammetriaan perustuvan yksittäisten puiden mittaamenetelmän ja –ohjelmiston. Ilmakuvamittauksen ongelmana metsäisissä olosuhteissa on kuitenkin maanpinnan huono näkyvyys. Kyseisen ongelman ratkaisi laserkeilaus (Airborne Laser Scanning – ALS), joka on mullistanut sekä rakennetun ympäristön että luonnonvarojen mittauksen, kartoituksen ja inventoinnin menetelmät.

Niin kuviokohtaisten puustotunnusten arvioinnissa (mm. Næsset 1997a,b, 2002, Packalén & Maltamo 2007, Peuhkurinen ym. 2007, Holopainen ym. 2010b) kuin yksittäisten puiden tunnusten mittaamisessa (mm. Hyypä & Inkinen 1999, Hyypä ym. 2001a, 2012, Maltamo ym. 2004, 2009, Korpela ym. 2010, Vauhkonen 2010, Yu ym. 2011) laserkeilaukseen perustuvilla 3D-menetelmillä päästään puustotunnusten estimoinnissa vähintään samaan tarkkuustasoon kuin perinteisessä operatiivisen metsäsuunnittelun kuvioittaisessa arvioinnissa. Laserkeilausta on hyödynnetty myös lukuisissa ekologisissa sovelluksissa, kuten puiden pituuskasvun mittauksessa (Yu ym. 2006), lahopuuston määrän (Pesonen ym. 2008) ja kasvupaikkojen estimoinnissa (Vehmas ym. 2009, Holopainen ym. 2010e) sekä puuston lehtipinta-alan ja harsuuntumisen arvioinnissa (Solberg ym. 2006, 2009, Kantola ym. 2010, 2013, Vastaranta ym. 2013a).

Metsävarojen inventoinnin ja metsäsuunnittelun näkökulmasta uuden laserkeilaukseen ja numeerisiin ilmakuviin perustuvan menetelmän etuna on etenkin se, että perinteiset puustotunnukset voidaan tuottaa ainakin kasvatus- ja uudistuskypsissä metsissä entistä tehokkaammin tinkimättä estimointitarkkuudesta. Toisena, etenkin metsäsuunnitteluinventoinnin näkökulmasta mielenkiintoisena etuna on, että suunnittelussa on mahdollista päästä eroon etukäteen määritetyistä kuviorajoista.

Inventointiyksiköistä (rasteri-ikkuna, pienkuvio) voidaan inventoinnin jälkeen muodostaa joustavasti halutunlaisia toimenpidekuvioita. Laserkeilaus mahdollistaa myös yksittäisten puiden automaattisen tulkinnan ja mittaamisen.

Laserkeilaukseen perustuvat 3D-mittaukset ovat parhaimmillaan maaston korkeusmallien laadinnassa, minkä vuoksi myös Maanmittauslaitos (MML) on hankkimassa koko Suomen kattavaa laserkeilausaineistoa (vuonna 2013 noin puolet Suomesta on keilattu). Tämän lisäksi kaikki keskeiset metsäalan organisaatiot Suomessa ovat parhaillaan rakentamassa operatiivisia järjestelmiä hyödyntääkseen uusia 3D-menetelmiä.

Laserkeilaukseen perustuva inventointimenetelmä vietiin operatiiviseen toimintaan melko nopeasti ensimmäisten lupaavien tutkimustulosten julkaisun jälkeen (Næsset 1997a,b, 2002; Hyypä ja Hyypä, 1999). Ensimmäinen laserkeilausinventoinnin operatiivinen (6000 ha) testi tehtiin Norjassa vuonna 2001, jota seurasi 46 000 ha kaupallinen inventointisopimus vuonna 2002. Ruotsissa ja Suomessa vastaavia operatiivisia testejä tehtiin vuosina 2003 ja 2004. Vuonna 2008 UPM-Kymmene laserkeilasi Suomessa metsiään jo 450 000 ha. Laserkeilaukseen perustuva yksityismetsien inventointi alkoi Suomessa operatiivisesti vuonna 2010, jolloin metsäsuunnittelua varten keilattiin yli 2 miljoonaa ha.

Oppikirjan ensimmäisessä osassa käydään läpi metsien mittauksessa, inventoinnissa, suunnittelussa ja seurannassa hyödynnettävien lasermittaustekniikoiden perusteet. Toisessa osassa keskitytään pohjoismaisiin ja pohjois-amerikkalaisiin tutkimuksiin, joissa on selvitetty uuden teknologian mahdollistamia metsätaloudellisia ja –tieteellisiä sovelluksia sekä tulevaisuuden näkymiä. Aihepiiristä ei ole tähän mennessä tehty laajempaa suomenkielistä oppikirjaa. Sen sijaan englanninkielisiä yhteenvetoja laserkeilauksen metsäsovelluksista ovat esittäneet mm. Næsset ym. (2004), Hyypä ym. (2008, 2009b) ja Holopainen ym. (2010g, 2013a).

Osa 1

Tekniikka ja menetelmät

2. Laserkeilaustekniikka

2.1 Lasermittausten historiaa

Charles Townes, Nikolai Basov ja Aleksandr Prokhorov kehittivät laserin vuonna 1958. He saivat työstään Nobelin fysiikan palkinnon vuonna 1964. Laserit ovat olleen laajassa käytössä sekä sotilastiedustelussa että siviilitutkimuksessa 1960-luvulta lähtien. Tuolloin Theodore Maiman demonstroi, että valoa on mahdollista laajentaa stimuloituilla lasersäteilyemissioilla elektromagneettisen spektrin infrapuna- ja optisessa osassa. NASA käytti laseria kuun etäisyysmittaukseen kulmaheijastimen avulla jo 1960-luvun alussa. 1970-luvulla NASA kehitti laseriin ja lentokonemittauksiin perustuvan menetelmän, jolla määritettiin klorofyllikeskittymiä. Merentutkimuksen sivutuotteena testattiin myös maanpinnan mittausta ja havaittiin metsistä tulevat laserpoikkileikkaukset (profiilit) hyödyllisiksi metsänmittauksessa. Tapahtuma on kerrottu tutkijoiden välisessä kirjeenvaihdossa alan pioneerin Ross Nelsonin mukaan seuraavasti: ”In the 1970’s, a team of NASA scientists had been on a flight mission over the Atlantic. Their objective was to test airborne lasers for experimental measurements for oceanographic studies. On their way home to the air base, they decided to leave the laser instrument on as they came off the water onto land. To their big surprise, they could see the profile of the trees and got the idea that maybe they could measure trees with lasers.”

Neuvostoliittolaiset tutkijat Solodukhin, Zukov ja Mazugin julkaisivat ensimmäisen artikkelin profiloivan laserin käytöstä metsänmittauksessa vuonna 1977 (Solodukhin ym.

1977). 1980-luvulla lasertutkimuksia tehtiin aktiivisesti Pohjois-Amerikassa (Nelson ym. 1984, 1988, Schreier ym. 1985, Aldred ja Bonnor 1985, Maclean ja Krabill 1986, Currie ym. 1989). Nelsson ym. (1984) mukaan laserilla mitatusta metsän poikkileikkauksesta (profiilista) on mahdollista määrittää latvuspeitto-prosentti ja puuston pituustietoa. Schreier ym. (1985) puolestaan raportoivat, että lähi-infrapun (near infra-red, NIR) aallonpituusalueen laser tuottaa puuston ja maaston profilitiedon. Euroopassa alan pioneerina toimi Mats Nilsson, Ruotsin maatalousyliopisto SLU:sta, joka esimerkiksi osoitti, että nosturiin asennetun laserin pituusmittaukset korreloivat metsien hakkuumuutosten kanssa (Nilsson 1990).

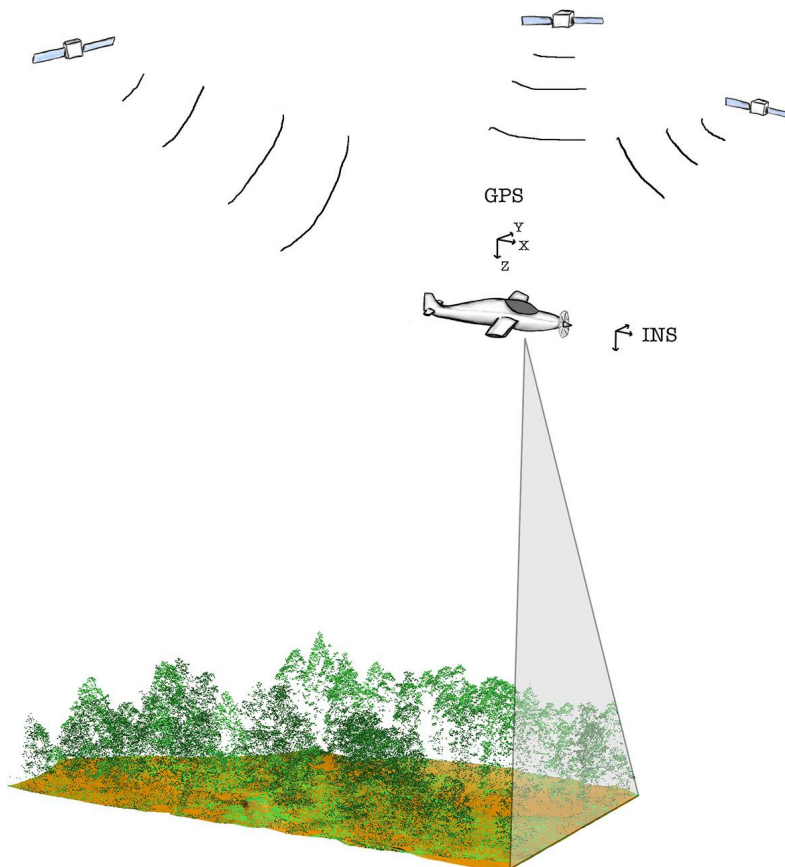
Kaukokartoitussovelluksia on perinteisesti kehitetty ensin sotilaskäyttöön ja vasta sen jälkeen siviilisovelluksiin. Näin tapahtui myös laserkeilauksen osalta. Esimerkiksi Ruotsin ilmavoimien tutkimuslaitoksessa (FOI) oli käytössään laserkeilain jo 1990-luvun alussa. Laserkeilauksen siviilisovellusten lähtökohdista voidaan pitää Stuttgartin yliopistossa 1990-luvun alussa tehtyjä ilmakuvaukseen ja laseretäisyysmittaukseen liittyviä tutkimuksia, joita tehtiin kanadalaisen Optech-yhtiön kanssa. Tutkimukset johtivat ensimmäiseen kaupalliseen lentolaserkeilaimeen vuonna 1994. Saksalainen TopScan hankki Optech-lentolaserkeilaimen vuonna 1994, ja lentolaserkeilauksen mahdollisuuksia esiteltiin syyskuussa 1994 järjestetyssä ”First Airborne Remote Sensing”-konferenssisarjassa Strassbourgissa. Tuolloin keskusteltiin lentolaserkeilauksen mahdollisuuksista mm. maaston korkeusmallin tuottamiseen.

2.2 Lentolaserkeilauksen tekniikka

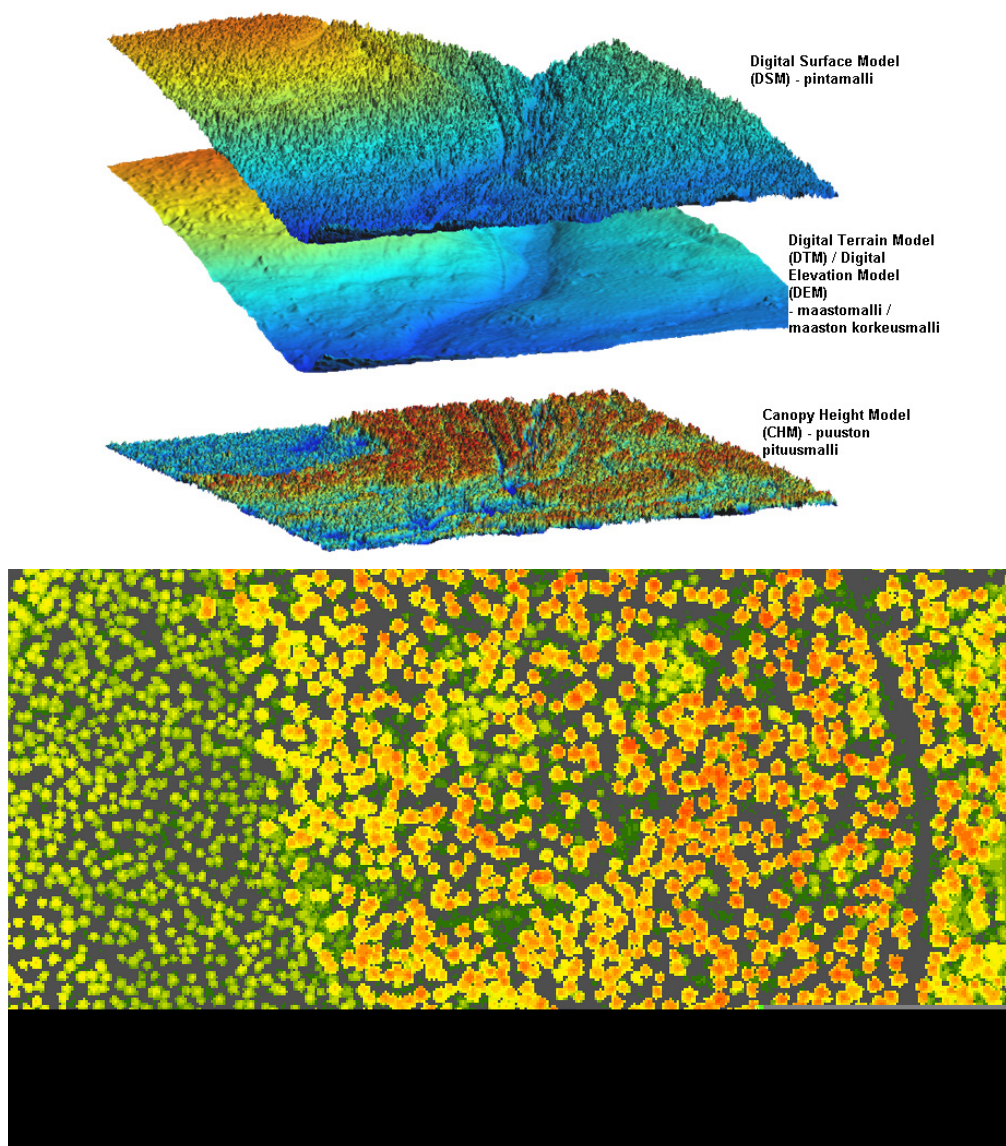
Lentolaserkeilaus (engl. Airborne laser scanning, ALS, myös ilmalaserkeilaus) on kaukokartoitustekniikka, jota käytetään pinnanmuotojen, kasvillisuuden, kaupunkialueiden, jään ja infrastruktuurin mallintamiseen. Terminä lentolaserkeilausta käytetään usein rinnan lasertutka- eli LiDAR-käsitteen rinnalla (engl. Light Detection and Ranging), sillä menetelmässä käytetään lasersädettä maanpinnan valaisemiseen ja fotodiodia takaisinsirontasäteilyn rekisteröimiseen. Laserkeilaus sisältää myös lasersäteen paikannuksen ja suunnan määrittämisen, kun taas LiDAR voi toimia ilman näitä. Käsitteenä laserkeilaus on eurooppalaista perua, kun LiDAR on laajem-

min käytössä Pohjois-Amerikassa. LiDAR-käsitteen alle voidaan katsoa kuuluvaksi sekä profiloivat mittaukset että laserkeilaus. Profiloivassa lasermittauksessa mitataan pelkästään lentolinjan alapuolella olevaa kapeaa linjaa. Keilaukseen perustuvalla menetelmällä puolestaan pystytään mittaamaan laajempaa lentokaistaa yhdellä kertaa. Laserkeilauksen menetelmät kehittyivät 1990-luvulla, joten kaikki 1970-1980-lukujen lasertutkimukset perustuivat profiloiviin mittauksiin.

Laserkeilain tuottaa kohteesta kolmiulotteista informaatiota. Laserkeilaimien kehityksen mahdollistivat lentokoneinertiajärjestelmien, keilaustaajuuden, GPS-järjestelmien ja lasertekniikan kehitys. Laserkeilaimen perusidea on yksinkertainen: kohteen ja laserin



Kuva 1. Lento-/ilmalaserkeilauksen periaate. Kuvan ©Ville Kankare.



Kuva 2. Yllä DSM, DTM ja CHM laserkeilauksessa. Alhaalla esimerkki laserkeilausaineistosta tehdystä metsäalueen pintamallista. Puut ja puuryhmät ovat näkyvillä. Pintamallille tyypillisesti kuva on koodattu väreillä, joista punainen viittaa korkeimpiin ja harmaa matalimpiin korkeuksiin. Alkuperäiset kuvat © St-Onge ja Ville Kankare.

välinen etäisyys mitataan laserpulssein kulkuajan perusteella, keilain pyyhkäisee laserpulsseja lentosuuntaa vastaan kohtisuorassa suunnassa, ja kun laserkeilaimen asento ja paikka ovat tarkasti tunnetut, mitattu etäisyys voidaan muuttaa korkeudeksi. Lyhyet laserpulsstit (esim. 4–10 ns) lähetetään korkealla

pulssintoistotaajuudella (esim. 50–400 kHz). Pulsseja poikkeutetaan lentosuuntaa vastaisesti käyttämällä erilaisia keilausmekanismeja. Lasertutkan asento ja sijainti määritetään tyypillisesti inertiajärjestelmien ja GPS-mittauksen avulla. Jokaista laserpulsssia vastaava etäisyys voidaan muuntaa x- y- ja z-koordinaateiksi.

4. Piirteiden irrotus ja valinta

4.1 Pintamallit

Laserkeilausaineisto on 3D-pisteaineistoa. Piirteiden laskennassa pisteistä käytetään seuraavia ominaisuuksia: sijainti (X, Y), kaiun tyyppi ja pisteen korkeus maanpinnasta. Lisäksi voidaan hyödyntää kaiun intensiteettiä (Korpela ym. 2010) tai koko aaltomuotoa (Heinzel ja Koch 2011). Lentolaserkeilauksella kerätystä pisteaineistosta irrotetaan yleisimmin piirteitä joko yksittäisen puun latvuksen tai aluepohjaisen menetelmän estimointiyksikön tasolta. Tällöin piirteiden irrotusyksikkö on latvussegmentti, rasterisolu (esim. 16 m x 16 m) tai mikrokuvio. Molempien menetelmien piirteiden irrotus perustuu pistemäisestä korkeustiedosta muodostettuun jatkuvaan maanpintamalliin (DTM, Digital Terrain Model), jonka avulla absoluuttiset korkeudet saadaan muunnettua korkeuksiksi maanpinnasta. Yksinpuintulkinnassa hyödynnetään myös puiden pituutta kuvaavaa pintamallia (puuston korkeusmalli, CHM, Canopy Height Model) (esim. Hyypä ja Inkinen 1999, Persson ym. 2002), joka saadaan kohteiden absoluuttista korkeutta kuvaavan mallin (Digital Surface Model, DSM) ja DTM:n erotuksena.

4.2 Pintamallien luonti

Yleisimmin käytetty menetelmä pintamallin (Digital Surface Model, DSM) muodostamiseksi on ottaa korkein kaiku annetusta ympäristöstä ja interpoloida puuttuvat korkeudet. Tämän jälkeen latvuston korkeusmalli (CHM) saadaan vähentämällä maanpinnankorkeus pintamallista. CHM:ää voidaan kutsua myös normalisoiduksi pintamalliksi (nDSM). DSM lasketaan korkeimmista ensimmäisistä kaiuista, kun taas DTM matalimmista viimeisistä kaiuista. Laserkaiukujen korkeus voidaan normalisoida vastaavasti, eli vähentämällä niistä maanpinnan korkeus (DTM).

4.3 Pintamallien laatu

Maastomallin laatu metsäolosuhteissa

Maastomallin tuotantoon laserpistepilvestä on kehitetty useita menetelmiä (Kraus ja Pfeifer 1998, Pyysalo 2000, Axelsson 1999, 2000, 2001, Elmqvist ym. 2001, Sithole 2001, Vosselman ja Maas 2001, Hyypä ym. 2001b, 2005, Sithole ja Vosselman 2004). DTM:n satunnaisvirhe vaihtelee metsässä n. 10–50 cm, mikä on riittävä puustotulkinnalle. Tarkkuuteen vaikuttaa metsikön rakenne ja käsittely



Kuva 13. Ensimmäisen pulssin (vasemmalla) ja viimeisen pulssin (oikealla) avulla laskettu puuston korkeusmalli.



Kuva 14. Lentolaserkeilauksen tuottama pintamalli yhdistettynä ortoilmakuvaan. Kuvan ©Ville Kankare.

kuten myös keilausparametrit, avauskulma ja pulssitiheys (Ahokas ym. 2005). Euroopan unionin rahoittamassa HIGH-SCAN projektissa (1998–2001) verrattiin kolmella metsäalueella Suomessa (Kalkkinen), Itävallassa (Hohentauern) ja Sveitsissä (Zumikon)) eri maastomallialgoritmeja keskenään (Hyypä ym. 2001b), taulukko 1.

Ahokas ym. (2002) vertailivat kolmea maastomallin laadintamenetelmää metsässä saaden satunnaisvirheeksi 13–41 cm. Reutebuch ym. (2003) raportoivat satunnaisvirheeksi 14 cm avohakkuille, 14 cm rajusti harvennetuille metsille, 18 cm lievästi harvennetuille metsille ja 29 cm luonnontilassa oleville metsille käyttäen TopEyen tuottamaa 4 pistettä/m² tiheyksistä lentodataa. Takeda (2004) pääsi tutkimuksessaan 10–20 cm virheeseen myös tiheissä metsissä.

Hyypä ym. (2005) analysoivat ajankohdan, lentokorkeuden, pulssimoodin, maaston mäkisyyden, metsän peittävyuden ja koeala-kohtaisen vaihtelun vaikutusta maastomallin tarkkuuteen. Tuloksia voidaan käyttää optimoimaan lentoparametrit halutun tarkkuuden suhteen. Mittausten testipaikkana oli 50 hehtaarin kokoinen alue Kalkkisissa, Suomessa. Aineisto hankittiin Toposys I- ja Toposys II –keilaimilla vuosina 1998, 2000 ja 2003. Pulssintoistotaajuus (83 kHz), maksimi keilauskulma ($\pm 7,1^\circ$), keilan koko (1 mrad) ja aallonpituus (1,5 μm) pysyivät mittauksissa vakioina. Mittaukset tallennettiin sekä touko-kesäkuussa (lehdet puissa, matala aluskasvillisuus) että lokakuussa (puut lehdetömiä, runsas aluskasvillisuus). Eri vuodenaikojen avulla saatiin selville 400 m:stä hankitun korkean pulssitiheyden piste-pilven (8–10 pulssia/m²) avulla kasvillisuu-

Taulukko 1. Maastomallialgoritmien tarkkuus metsissä.

	Menetelmä 1		Menetelmä 2		Menetelmä 3	
Metsäalue	SE	Harha	SE	Harha	SE	Harha
Kalkkinen: maan pinta	0,24	0,20	0,39	-0,16	0,25	0,10
Kalkkinen: puusto	0,23	0,08	0,35	-0,33	0,22	-0,03
Kalkkinen: kova pinta	0,09	0,02	0,24	-0,54	0,09	-0,08
Kalkkinen: kaikki	0,23	0,22	0,37	-0,31	0,23	0,003
Hohentauern: kaikki	0,25	-0,46	0,22	-0,16	0,40	0,05
Zumikon: kaikki	0,40	0,13	0,29	0,11	0,28	0,20

den vaikutus metsästä kerätyn maastomallin tarkkuuteen. Lentokorkeuden vaikutusta maastomalliin tutkittiin 400, 800 ja 1500 m:n korkeuksista. Koealueet valittiin niin, että ne edustivat erilaisia metsiköitä ja maastokorkeuksia. Referenssiaineisto tuotettiin takymetrillä ja GPS-mittauksilla. Mitatut pisteet jaoteltiin tasaisesti koealueen sisällä noin 2 m etäisyydelle toisistaan. Yhteensä tallennettiin 2119 pistettä.

Tutkimuksen perusteella oli mahdollista päätellä seuraavaa: Pohjoisissa havumetsissä korkeusmallin tarkkuus on parempi kuin 20 cm pois lukien jyrkät rinteet. Korkeusmallissa on systemaattista lentokorkeudesta johtuvaa vaihtelua, minkä uskotaan aiheutuvan keilan koosta ja lasermenetelmän herkkyydestä. Satunnaiset virheet lisääntyvät kumpuilevassa maastossa ja puuston peittävyys vaikutus on suurin puiden runkojen läheisyydessä. Koealakohdaiset erot ovat suuria: puuston peittävyys, kaltevuus ja aluskasvillisuus vaikuttavat merkittävästi tuloksiin.

Ahokas ym. (2005) ehdottivat, että keilauskulman optimointi otettaisiin mukaan kansallisiin keilauksiin, koska sen avulla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Pohjoisissa havumetsissä keilauskulma aina 15 asteeseen asti on osoittautunut käyttökelpoiseksi. Uudet keilaimet mahdollistavat tyypillisesti 25–37,5 asteen maksimaalisen poikkeuksen vertikaalista. Viimeisen 10 vuoden aikana keilauskulmia onkin jatkuvasti kasvatettu.

Latvuston korkeusmallin laatu

Lentolaserkeilauksella puusta saadut suorat havainnot ovat usein aliarvioita (Nelson ym. 1988, Hyypä ja Inkinen 1999, Lefsky ym. 2002, Rönholm ym. 2004). Ensimmäinen paluukaiku heijastuu harvoin puun korkeimmasta latvuksen osasta. Laserkeila voi osua puun korkeimpaan kohtaan, mutta ohut latva ei ole tarpeeksi tiheä aikaansaamaan tunnistettavaa paluukaikua. Näin ollen puuston ylimmän osan havaitseminen vaatii riittävän laserpulsstiheyden tai keilan koon ja riittävän herkkyyden vastaanottimessa. Tiheä aluskas-

villisuuden aiheuttama DTM:än yliarvio ja puiden korkeimpien kohtien havaitsematta jääminen aiheuttavat aliarviota CHM:ään. Muita vaikuttavia tekijöitä puun pituuden arvioinnissa on lentokorkeus, pulssitiheys, keilan koko, käytetyt mallinnusalgoritmit, laserkeilaimen ominaisuudet (mm. herkkyys vastaanottaa paluukaikuja ja keilauskulma), puun latvuksen muoto ja tiheys (Hyypä ja Inkinen 1999, Persson ym. 2002, Gaveau ja Hill 2003, Holmgren 2003, Leckie ym. 2003, Yu ym. 2004a, Maltamo ym. 2004, Chasmer ym. 2006, Falkowski ym. 2006).

4.4 Piirteiden irrotusyksikkö ja geometriset piirteet

Hilaruutu: Metsikkötunnuksia laskettaessa laserpiirteet irrotetaan yleisesti säännöllisestä hilaruudukosta. Hilaruudun koko on tyypillisesti 100–900 m². Käytetyn hilaruudukon koko riippuu käyttötarkoituksesta ja myös maastokoealojen koosta. Pienellä hilaruudukolla tehty tulkinta lähestyy yksinpuintulkintaa, kun taas suuri hilaruutu voi vastata jo lähes koko metsikkökuviota. Suomen operatiivisessa metsäsuunnittelun laserinventointijärjestelmässä käytetty piirteiden irrotusyksikkö on 16 m x 16 m hilaruutu.

Mikrokuviot: Mikrokuviot tuotetaan automaattisesti tai puoliautomaattisesti kaukokartoitusaineistoa segmentoimalla. Yleisesti mikrokuvioinnissa käytetään laseraineistoa, ilmakuvia, satelliittikuvia tai edellä mainittujen yhdistelmiä. Mikrokuvio on spatiaalisesti jatkuva, puustotunnuksiltaan mahdollisimman homogeeninen alue, joka noudattaa metsikön luonnollisia rajoja. Luonnolliset rajat ovat mikrokuvion etu verrattuna hilaruutuun.

Latvussegmentti: Laseraineistosta tai ilmakuvilta voidaan segmentoida yksittäisten puiden latvuksia. Ilmakuvilla segmentointi perustuu sävyarvoihin ja kuvan tekstuuriin, kun laseraineiston segmentointi hyödyntää yleensä latvustonpintamallin (CHM) 3D-informaatiota.

Yksinpuintulkinta on perustunut suoraan puun ominaisuuksien mittaamiseen segmen-toidusta pisteaineistosta (Hyyppä ja Inkinen 1999). Näitä ominaisuuksia ovat puun pituus ja latvuksen dimensiot. Pulssitiheyksien kasvu on mahdollistanut myös muiden puun latvuksesta laskettavien geometrinen piirteiden hyödyn-tämisen. Nämä piirteet kuvaavat latvuksen tilavuutta, muotoa ja rakennetta (Vauhkonen ym. 2010).

4.5 Laserpisteiden korkeusjakaumat

Aluepohjaisessa menetelmässä yleisesti käytettyjä piirteitä ovat normalisoitujen laser-pisteiden (korkeuksia maanpinnasta) korkeus-jakaumasta lasketut prosenttipisteet sekä korkeuden keskiarvo, suhteellisten korkeuksien tai prosenttipisteiden tiheydet, keskihajonta ja variaatiokerroin (Næsset 2002). Prosenttipisteet ovat alhaaltapäin laskettuja laserpisteiden korkeusjakauman arvoja, jotka kertovat, millä korkeudella tietty kumulatiivinen osuus heijastuneista pisteistä on. Selittävänä muuttujana käytetään myös kasvillisuusosuutta eli sitä, kuinka suuri osa mitattavan alueen laserpulsseista on heijastunut puustosta tai pensaista (korkeus esimerkiksi yli 2 metriä). Piirteet lasketaan erikseen eri paluukaikuille (esim. ensimmäisille ja viimeisille paluukaikuille). Pulssitiheyksien kasvaessa yksinpuintulkinnan ja aluepohjaisen laserkeilausmenetelmän piirteiden irrotus on tullut lähemmäksi toisiaan (esim. Yu ym. 2010). Samoja yllä esiteltyjä piirteitä, jotka ovat yleisesti käytössä aluepohjaisissa menetelmissä, on laskettu yksittäisten puiden latvussegmenttien alueilta ja käytetty ennustamaan yksittäisen puun tunnuksia.

4.6 Intensiteetti ja aaltomuoto

Paluukaiun voimakkuutta kutsutaan intensiteetiksi. Yleisimmin intensiteettiä piirteitä on hyödynnetty puulajitulkinnassa (mm. Korpela ym.

2010). Paluukaiun intensiteetti riippuu kohteen heijastusominaisuuksista ja geometriasta. Tämän lisäksi siihen vaikuttaa laserpulssein lähetysvoimakkuus, lähetystaajuus ja kaiun vastaanottimen asetukset, kuten myös ilmakedä. Intensiteetin kalibrointi ei ole ongelmatonta ja tämä vaikeuttaa intensiteettiä piirteiden käyttöä selittävinä muuttujina (Kaasalainen ym. 2009). Paluukaikujen intensiteeteistä voidaan laskea kaikutyypeittäin korkeuden prosenttipisteitä sekä intensiteettijakauman momentteja, kuten keskiarvo, varianssi, vinous (skewness) ja huipukkuus (kurtosis).

Paluukaiusta voidaan tallentaa myös koko kaiun aaltomuoto (full waveform). Aaltomuodosta voi tulkita mistä diskreetinaaineiston paluukaikut ovat tulleet ja toisaalta se kertoo paluukaiun intensiteetistä. Aaltomuotoaineistosta irrotettavia piirteitä ovat kaiuan amplitudi, pituus, pinta-ala, vinous ja huipukkuus.

4.7 Piirteiden valinta

Laseraineistosta irrotettujen piirteiden määrä on helposti niin suuri, että haluttujen tunnus-ten ennustamista varten niiden määrää pitää vähentää. Parhaiten puu- ja puustotunnusten kanssa korreloivien piirteiden valintaan on olemassa useita eri menetelmiä, jotka ovat pääosin samoja, mitä käytetään muiden kaukokartoitusaineistojen kanssa piirteiden valinnassa. Automaattisen piirteiden valinnan perusmenetelmä on askeltava regressio. Muita menetelmiä ovat mm. ”ridge regression”, ”best subset regression” ja LASSO. Ei-parametrinen menetelmien piirteiden valinnassa yleisesti käytettyjä menetelmiä ovat erilaiset luokitus-algoritmit, kuten geneettinen algoritmi (Goldberg 1989) ja random forest (Breiman 2001). Piirteiden valintamenetelmien kirjo on kasvanut avoimen lähdekoodin ohjelmien myötä huomattavasti. Useissa tutkimuksissa piirteiden valintamenetelmien välillä ei ole todettu olevan suurta eroa. Toisaalta tulokset ovat myös ristiriitaisia keskenään.

5. Puusto ja kasvupaikkatunnusten inventointimenetelmät

Kuten kappaleessa 3.2 lyhyesti jo todettiin, lentolaserkeilauksessa on tällä hetkellä olemassa kaksi päätekniikkaa puustotietojen tuottamiseen: yksinpuintulkinta (Individual Tree Detection, ITD, Hyyppä ja Inkinen 1999) ja tilastollisiin riippuvuussuhteisiin perustuva aluepohjainen menetelmä (Area Based Approach, ABA, Næsset 2002), jossa ennustetaan puustotunnuksia suoraan koealalle.

5.1 Aluepohjainen laserkeilausinventointi

ABA-menetelmä perustuu vahvaan tilastolliseen riippuvuuteen maastokoealojen ja laserpiirteiden välillä. Estimoinnissa voidaan hyödyntää myös ilmakuvia. Maastokoealoilta mitattujen puustotunnusten ja vastaavalla alueelta irrotettujen laser- (ja ilmakuva)piirteiden välinen tilastollinen riippuvuus mallinnetaan. ABA-menetelmässä yleisesti käytettyjä piirteitä ovat normalisoitujen laserpisteiden (korkeuksia maanpinnasta) korkeusjakaumasta lasketut prosenttipisteet sekä korkeuden keskiarvo, suhteellisten korkeuksien tai prosenttipisteiden tiheydet, keskihajonta ja variaatiokerroin. Prosenttipisteet ovat alhaalta-päin laskettuja laserpisteiden korkeusjakauman arvoja, jotka kertovat, millä korkeudella tietty kumulatiivinen osuus heijastuneista pisteistä on. Selittävänä muuttujana käytetään myös kasvillisuussuutua, eli sitä, kuinka suuri osa mitattavan alueen laserpulsseista on heijastunut puustosta tai pensaista (korkeus esimerkiksi yli 2 metriä). Piirteet lasketaan erikseen eri paluukaiuille (esimerkiksi ensimmäisille ja viimeisille paluukaiulle). Lisäksi puustotunnusten ennustamisessa voidaan käyttää laserintensiteettiä ja ilmakuvapiirteitä.

ABA-menetelmän tarkkuus riippuu maastokoealojen tarkkuudesta ja kattavuudesta. Inventointia varten maastossa mitataan tarkasti paikkaan sidottuja koealoja puittain. Koealojen tulee edustaa mahdollisimman hyvin koko inventoitavan alueen puuston vaihtelu, joten onnistunutta koealojen valintaa varten tarvi-

taan ennakkotietoa inventoitavasta alueesta (kts. Maltamo ym., 2011). ABA:n otosyksikkö on useimmiten hilaruutu (esim. 16 m x 16 m), jonka koko vastaa maastossa mitattua koealaa. Hilaruudulle osuneista laserpulsseista lasketaan piirteitä, joiden avulla puustotunnukset ennustetaan kaikille hilaruuduille. Kuvion puustotunnukset muodostetaan tarvittaessa kuviolle osuvien hilaruutujen puustotunnusten ennusteista.

Yleisiä malleja laserpiirteiden ja puustotunnusten välillä ei toistaiseksi ole olemassa. Samanlaisesta metsästä (koealalta) irrotetut laserpiirteet voivat vaihdella riippuen keilausparametreistä. Lentokorkeus, keilauskulma, keilan tulokulma latvukseen, keilan koko maanpinnalla ja pulssitiheys vaikuttavat kaikki laskettuihin piirteisiin, ja siksi riippuvuus maastokoealojen ja laserpiirteiden välillä mallinnetaan aineistokohtaisesti.

Käytännön metsäsuunnittelussa ennustettavien tunnusten määrä on suuri ja jokaiselle tunnukselle erikseen laadittavien regressiomallien laatiminen on työlästä. Ei-parametriset k:n lähimmän naapurin menetelmät ovatkin yleistyneet puustotunnusten ennustamisessa (Maltamo ym. 2006, Packalen ym. 2007, Hudak ym. 2008, kts. kuva 12). Hudak ym. (2008) vertailivat eri NN-menetelmiä pohjapinta-alan ja runkoluvun ennustamisessa puulajiositteitain ja totesivat RandomForest-menetelmän olevan joustavin ja tuottavan tarkimpia ennusteita. Muita menetelmiä lähimpien naapurien valintaan oli euklidinen etäisyys (k-NN), mahalanobis-etäisyys, ICA-analyysi, kanoninen korrelaatio (k-MSN) ja GNN (gradien nearest neighbor). Puustotunnusten ennustamisessa on käytetty NN-menetelmien lisäksi bayesilaisista lähestymistapaa (Junttila ym. 2008), teoreettista puustotunnusten johtamista laserpistepilvestä (Mehtätalo ja Nyblom 2009) sekä neuroverkkoja (Niska ym. 2010).

5.2 Yksinpuintulkinta

Yksittäisten puiden kolmiulotteista mittausta voidaan tehdä joko ilmakuvamittaukseen eli digitaaliseen fotogrammetriaan tai laserpiste-

pilviin perustuen. Laserpistepilviä käytettäessä yksittäisen puiden tunnistaminen perustuu useimmiten latvuston pintamallin (CHM) lokaalien maksimien etsimiseen. Ennen lokaalien maksimien etsintää pintamallia voidaan suodattaa. Suodattimen koko ja suodatuksen voimakkuus säädetään puun kokoa ja kuvan resoluutiota vastaavaksi. Ilman suodatusta riskinä on, että isompien puiden oksat tulevat tulkituksi virheellisesti puiksi. Suodatuksen ja lokaalien maksimien etsimisen jälkeen puun latvuksen rajat erotetaan segmentoimalla. Latvuston pintamallin tarkkuuteen vaikuttaa laserkeilausaineiston pulssitiheys. ITD:n edellytyksenä pidetään n. 5–6 pulssia/ m², mutta samalla tekniikalla voidaan laskea yksittäisten puiden tai puuryhmien piirteitä jopa alle 2 pulssia/m² pulssitiheyden laseraineistosta. ITD-menetelmällä puusta voidaan mitata suoraan puun pituus, joka on latvuston pintamallin lokaali maksimi. Lokaalin maksimin sijainti määrää myös puun sijainnin.

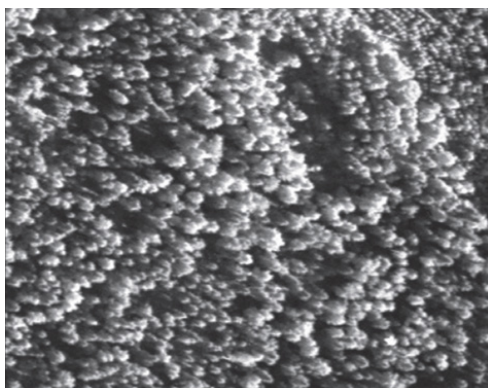
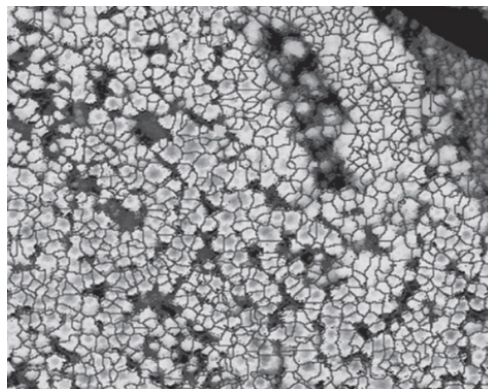
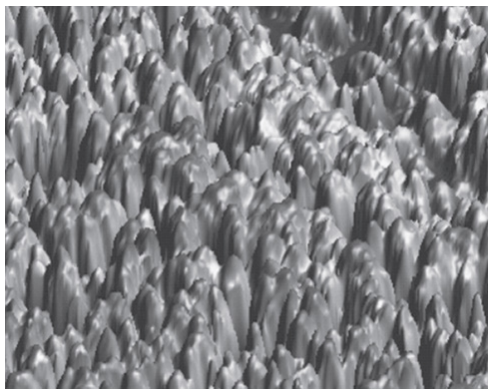
Hyypä & Inkinen (1999), Friedlaender & Koch (2000), Ziegler ym. (2000), Wulder ym. (2000) ja Hyypä ym. (2001a) esittelivät yksittäisten puiden tulkintaan perustuvan inventoinnin etsimällä yksittäisten puiden sijainnit paikallisten maksimien kautta ja latvusten rajat segmentoinnilla. He esittelivät myös perustan laserpohjaiselle yksinpuintulkinnalle: yksittäisten puun sijainti, puun pituus, latvuksen halkaisija ja puulaji tulkitaan laserin, ja mahdollisesti myös ilmakuvien avulla, ja vastaavasti puiden läpimitta, pohjapinta-ala ja tilavuus johdetaan mitattujen suureiden avulla. Johtamiseen voidaan käyttää estimointimenetelmiä tai olemassa olevia malleja. Morsdorf ym. (2003) esittivät kaksivaiheisen menetelmän, jossa puiden sijainnit määritettiin normalisoidun DSM:n ja paikallisten maksimien ja puiden latvusten rajaus klusteroinnin avulla.

Hyypä ym. (2005 ja 2006) esittivät puurykelmiin perustuvan inventoinnin yksinpuintekniikan avulla. Vuoden 2005 tutkimuksessa vertailuna olivat segmentit, joissa todellisuudessa oli useampiakin puita. Vuonna 2006 käytettiin matalan tiheyden laseraineistoa ja joko päättelysääntöjen avulla tai tilavuusmallien avulla laskettiin koko puuryhmän

tilavuus. Tulokset osoittivat, että yksittäisten puiden tilavuus saavutetaan tarkkuudella, jossa satunnaisten virheiden osuus on 30 %, ja pienet puurykelmät tarkkuudella, jossa satunnainen virhe on 37 %.

Laserkorkeuden avulla määritetyn puun pituuden on todettu olevan systemaattinen aliarvio (esim. Rönnholm ym., 2004). Puun laserpituutta voidaan kalibroida maastomittauksilla. Puun läpimittaa ei pystytä mittaamaan suoraan pistepilvestä, vaan se täytyy ennustaa. Ennustamisessa voidaan käyttää yleisiä allometrisia malleja (Kalliovirta ja Tokola, 2005), lokaaleja regressiomalleja (Peuhkurinen ym. 2007) tai NN-menetelmiä (Maltamo ym. 2009, Yu ym. 2010, 2011). ITD-menetelmässä puutunnusten ennustamisessa ovat yleistyneet myös muut geometriset piirteet (Holmgren ja Persson 2004; Vauhkonen 2010, Vauhkonen ym. 2010), kuten myös laserkorkeusjakauman hyödyntäminen (Villikka ym. 2007). Puulajin määrittämisessä hyödynnetään apuna usein myös ilmakuvia tai laserin intensiteettiä sekä NN-menetelmiä (Korpela ym. 2010). Puutunnuksia ennustettaessa NN-menetelmillä tarvitaan ennustamiseen puittainen opetusaineisto, jonka pitää kattaa useita havaintoja jokaisesta ennustettavasta puulajista ja kokoluokasta. ITD-menetelmällä tehtävää metsien inventointia varten maastomittauksia ei välttämättä tarvita, jos puutunnukset mitataan suoraan pistepilvestä ja puuttuvat tunnukset ennustetaan olemassa olevilla malleilla. ITD:n merkittävimpiä virhelähteitä ovat puiden löytyminen/paikannus (kts. kuva 16), puuttuvien tunnusten mallintaminen ja puulajitulkinta (Holopainen ym. 2010a, Vastaranta ym. 2011c).

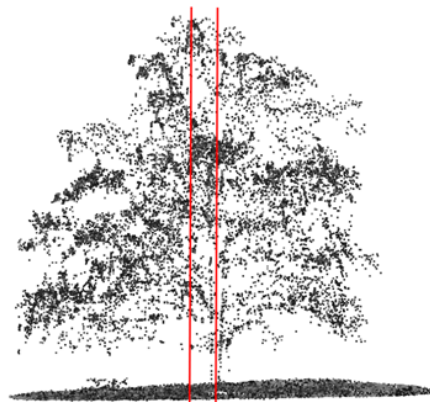
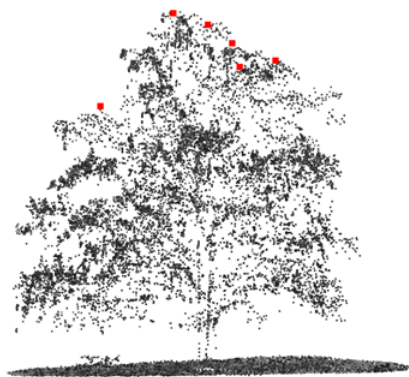
Yksittäisen puun tasolla tärkein tunnus on rinnankorkeusläpimitta, josta runkomuoto, tilavuus ja puutavaralajien kertymät ennustetaan. Yksinpuintulkinnalla saadaan suoraan tietoa puun pituudesta ja latvuksen läpimitasta, ja näiden tunnusten avulla on ennustettu läpimittaa (Kalliovirta ja Tokola 2005). Pituuden ja läpimitan välinen allometrinen suhde ei ole yhtä vahva kuin läpimitan ja pituuden. Tästä syystä tällä tavalla läpimittaa ennustettaessa syntyy merkittävää epävarmuutta. Lähimmän naapurin menetelmillä on pystytty



Kuva 15. Puuston korkeusmalli (vasemmalla), segmentoitu puuston korkeusmalli (oikealla) ja vastaava ilmakuva (vasemmalla alhaalla).

tarkentamaan yksittäisen puun ominaisuuksien ennustamista (Maltamo ym 2009, Vauhkonen ym. 2010, Yu ym. 2011). Menetelmä vaatii tuekseen tarkan opetusaineiston. Lähimmän naapurin menetelmillä pystytään ennusta-

maan myös muita kuin perinteisiä puutunnuksia. Esimerkiksi yksinpuintulkinnan ja hakkuukoneella kerätyn puunlaatuaineiston yhdistäminen voisi parantaa puutavaralajien ennustustarkkuutta.



Kuva 16. Puiden ALS-paikannuksen ongelmia (Holopainen ym. 2013).

6. Maastolaserkeilaustekniikka

6.1 Yleisesti maastolaserkeilaustekniikasta

Maastolaserkeilaimella (TLS, Terrestrial Laser Scanning, maastolaserkeilaus tai maalaserkeilaus) tarkoitetaan useimmiten kolmijalalle sijoitettua laserkeilainta. Maastolaserkeilain mittaa ympäristöstään kohteiden kolmiulotteiset koordinaatit suunnattua laseretäisyysmittausta käyttäen: suunta ja etäisyys kohteeseen mitataan, ja näiden perusteella lasketaan kohdepisteen kolmiulotteinen sijainti. Maastolaserkeilaimet jaetaan etäisyysmittausperiaatteen perusteella kahteen luokkaan, pulssilaserkeilaimiin ja vaihe-erokeilaimiin. Pulssilaserkeilaimet määrittävät etäisyyden mittaamalla lyhyen laserpulssein kulkuajan keilaimesta kohteeseen ja takaisin. Vaihe-erokeilaimet lähettävät jatkuvaa lasersädettä, ja etäisyys määritetään lähtevän ja palaavan säteen vaihe-erosta. Pulssilaserkeilaimien voidaan katsoa sopivan paremmin laajojen alueiden kartoitusmittauksiin, jolloin etäisyys kohteeseen voi olla jopa kilometrin, kun taas vaihe-erokeilaimet ovat parhaimmillaan lähellä olevien kohteiden, kuten yksittäisten puiden ja koealojen yksityiskohtaisemmassa mittauksessa.

Lentolaserkeilauksen (ALS), liikkuvan maastolaserkeilauksen (MLS) ja maastolaserkeilauksen (TLS) yksinkertainen tekninen ero

on käytetyssä alustassa: lentokone, liikkuva ajoneuvo, lennokki tai pelkkä kolmijalka. MLS voidaan myös toteuttaa joko välillä pysähtyen (engl. stop-and-go) ja keilaten tai jatkuvasti liikkeestä. Stop-and-go-malli tuottaa samalaista dataa kuin perinteinen, kolmijalalle asetettu TLS. Etuna menetelmässä on se, että näin saadaan tarkennettua puiden kartoitusta ja mittausta (yhdestä keilauspisteestä näkymättömät puut). Lennokin käyttö laserkeilauksessa voidaan katsoa kuuluvan joko lentolaserkeilaukseen tai liikkuvaan maastolaserkeilaukseen. Sekä ALS että MLS perustuvat suorapaikannukseen satelliittipaikannuksen (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS) ja inertian (IMU) avulla ja siten niissä on multisensoraalinen paikannusmenetelmä aina keilaimeen liitettynä.

Maastolaserkeilaimella voidaan tuottaa nopeasti tiheä kolmiulotteinen pistepilvi ympäröivästä puustosta. Mittaukseen kuluva aika riippuu haluttavasta pistetiheydestä ja mittausalasta. Esimerkiksi nykyaikaisilla vaihe-erokeilaimilla koko ympäröivän tilan mittausta 70–120 metrin etäisyyteen asti kestää 2–4 minuuttia, kun pistetiheys on valittu niin, että 10 metrin päässä keilaimesta yksittäisten pisteiden välinen etäisyys on 6,3 mm. Tällöin 10 metrin päässä keilaimesta saadaan noin 25000 pistettä/m². Vain keilaimelle suoraan näkyviä kohteita voidaan mitata, joten puuston tiheys, -peitteisyys ja mittauseroimetria vaikuttavat siihen, mitä pistepilvessä näkyy ja kuinka



Kuva 17. Jalustalle asennettu 3D-maastolaserkeilain (TLS). Kuvan ©Ville Kankare.



Kuva 18. TLS-mittauksen tuottamaa intensiteettikuvaa puustosta (Seurasaari). Kuvan ©Matti Vaaja & Hannu Hyypä.

hyvin siitä edellä mainitut ominaisuudet ovat mitattavissa. Koealoja voidaan kuitenkin mitata yli 10 yhden työpäivän aikana, kun perinteisessä koelamittauksessa mittausnopeus on tyypillisesti 3–5 koelaa päivässä.

Tunnusomainen ero maastolaserkeilauksen ja lentolaserkeilauksen välillä on, että mittausgeometria on lähes kohtisuoraan ylhäältä alas lentolaserkeilauksessa ja lähes vaakasuoraan maastolaserkeilauksessa. Lentolaserkeilauksessa pistetiheys on hyvin tasainen, koska kaikki kohteet ovat lähes samalla etäisyydellä; puiden korkeuserosta ja maanpinnan topografiasta johtuvat muutokset ovat pieniä suhteessa lentokorkeuteen. Lentolaserkeilaus mittaa ennen kaikkea puuston pituuteen ja pituusrakenteeseen liittyviä piirteitä. Maastolaserkeilauksessa pistetiheys vaihtelee voimakkaasti, ja mittaus kuvaa puuston horisontaalirakennetta: runkojen leveyttä, latvusten leveyttä ja aluskasvillisuutta. Inventoinnin osalta onkin optimaalista yhdistää maastolaserkeilaus ja lentolaserkeilaus. Lentolaserkeilaus on jo nykyisin operatiivista ja hyvin todennäköisesti myös maastolaserkeilaus muuttuu operatiiviseksi lähivuosina.

Maastolaserkeilaus voidaan toteuttaa operatiivisesti joko kolmijalkamittauksena (TLS) tai liikkuvalla alustalla (MLS). Liikkuva alusta voi olla esimerkiksi auto (Kuva 19), moottorikelkka, mönkijä, reppu tai hakkuukone. Liikkuva alusta mahdollistaa tasaisemman pistejakauman, mutta teknologisenä ongelmana on tällä hetkellä liikkuvan alustan tarkka paikannus metsässä.

6.2 Usean keilauksen käyttö puuston koelamittauksessa

Metsikkökoelaman maastolaserkeilaus (terrestrial laser scanning, TLS) voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla: yhtenä keilauksena koelaman keskipisteestä (Liang ym. 2011), tai useampana keilauksena eri puolilta koelaa (Hopkinson ym. 2004; Henning ja Radtke 2006). Yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen erillisen prosessoinnin etuna on nopeus ja kerrallaan tallennetun ja muistissa olevan pistemäärän suhteel-



Kuva 19. MLS-keilain (FGI-roamer) auton katolle asennettuna. Kuvan ©Antero Kukko (FGI).

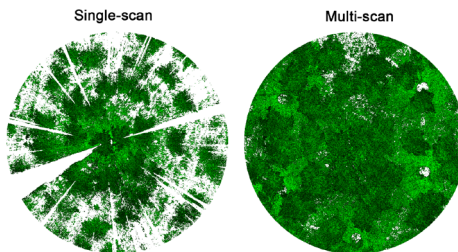
linen pienuus. Haittapuolena ovat katvealueet, joita muodostuu puunrunkojen kaltaisten läpäisemättömien kohteiden taakse. Toinen yhdestä pisteestä tehdyn keilauksen ongelma on pistepilven tiheyden riippuvuus kohteen etäisyydestä keilaimesta; kaukana olevasta puusta saadaan siis vähemmän pisteitä kuin samankokoisesta lähellä olevasta, mikä vaikuttaa mallinnustarkkuuteen ja käytettävissä oleviin menetelmiin. Yhdistettäessä useita koelasta tehtyjä keilauksia vältetään katveiden ja epätasaisen pistetiheyden aiheuttamilta ongelmilta. Työmäärä tosin lisääntyy huomattavasti sekä maastossa että jälkikäsittelyssä, kun eri keilauksia sovitetaan yhteen. Yhteensovitus voidaan tehdä joko piste- tai objektitasolla. Pistetasolla pistepilvet yhdistetään aluksi ja muodostetaan kaikkien keilauksien muodostama pistepilvi, jolle sitten tulkinta toteutetaan. Objektitason yhdistämisessä kukin keilaus prosessoidaan ensin ja vasta tulkitut puun rungot yhdistetään (kts kuva), tällöin usean keilauksen yhdistämisessä prosessointi on kuitenkin sama kuin



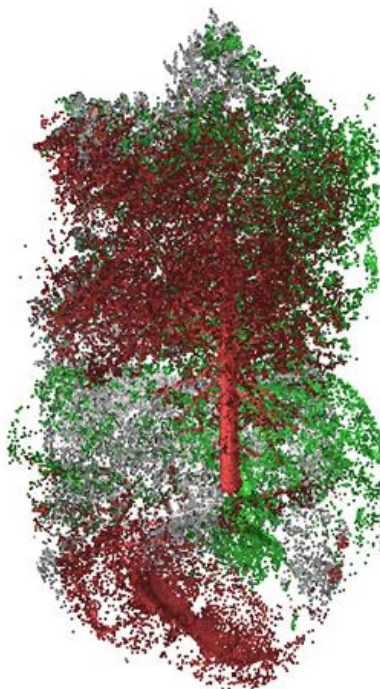
Kuva 20. Referenssipalloja, joiden avulla useampi keilaus voidaan liittää toisiinsa. Kuvan ©Ville Kankare.

yksittäisille keilauksille. Metsikkökoealojen TLS-mittausten automatisointia tutkitaan parhaillaan ja parhaat käytännöt eivät ole vielä selvillä. Koealatietoa tullaan tulevaisuudessa tuottamaan joka tapauksessa usean keilauksen avulla, mutta tehdäänkö keilauksien yhdistäminen piste- tai objektitasolla on tällä hetkellä tutkimuksen peruskysymys. Pistepilvien rekisteröinti toisiinsa on vaikeampaa automaattisesti ja se on laskennallisesti hitaampaa, mutta sillä saavutetaan tarkempi kuvaus yksittäisen puun rungosta. Mutta toisaalta, jos puun rungoista tulevien pistepilvien tasaisuutta käytetään runkojen löytymiseen, yksittäisen keilauksen prosessoinnilla saataneen parempi tarkkuus puiden löytymiselle. Osa kuvankäsittelymenetelmistä osaa myös ennustaa varjossa olevan runkopuun osuuden. Niinpä käytetyt prosessointimenetelmät osaltaan ratkaisevat, miten mittaus optimaalisesti tulee suorittaa.

Viime aikoina on myös todettu (Lindberg 2012), että käytettäessä maastolaserkeilauksen tuloksia lentolaserkeilauksen opetukseen, ei ole tarpeen löytää kaikkia koealan puita maastolaseraineistoista, kunhan löydetty puut edustavat koealojen puustopopulaatiota.



Kuva 21. Yhden keilauksen (single-scan) ja useamman keilauksen (multi-scan) tuottama tulos metsikkökoealalta ylhäältä päin katsottuna. Kuvan ©Ville Kankare.



Kuva 22. Yhden puun pistepilvet useammasta TLS-keilauksesta yhdistettynä (Kankare ym. 2013 a). Kuvan ©Ville Kankare.

Osa 2

Sovellukset ja tulevaisuus

7. Maastolaserkeilaus metsävaratiedon tuottamisessa

7.1 Puustotunnusten määrittäminen maastolaserkeilauksesta

TLS-mittauksia on tutkittu erityisesti tärkeimpien puustotunnusten, kuten rinnankorkeusläpimitan, puuston pituuden ja runkojen sijainnin osalta mm. julkaisuissa (Watt ja Donoghue 2005, Huang ym. 2011, Liang ym. 2011, 2012a, 2012b, 2013, Lovell ym. 2011, Holopainen ym. 2011b, 2013b). Lisäksi on tutkittu mm. lehtipinta-alaindeksin (leaf area index, LAI, Hosoi ja Omasa 2006, Strahler ym. 2008) sekä tilavuuden ja biomassan määrittämistä (Lefsky ja McHale 2008, Holopainen ym. 2011a, Kankare ym. 2013a, Yu ym. 2013). Rungoista, oksista ja lehvästöistä on tuotettu automaattisia TLS-malleja yksittäisestä puusta (Pfeifer ja Winterhalder 2004, Cote ym. 2009) ja koealoista (Hopkinson ym. 2004, Henning ja Radtke 2006, Liang ym. 2011). Puuston rakennetta on tutkittu myös lento- ja maastolaserkeilauksen yhdistelmän avulla (Lovell ym. 2003, Watt ja Donoghue 2005). Maastolaserkeilauksen ongelmana on, että vain keilainta lähellä olevat puut voidaan mitata ja mittausgeometria vaikuttaa voimakkaasti tuloksiin. Ennen kuin koealan puustotietojen mittausta saadaan täysin automatisoitua, TLS:n vahvuudet ovat muiden kuin perinteisten puustotunnusten mittaamisessa. TLS-aineistosta voidaan mitata latvustunnuksia, runkokäyrä tai jopa yksittäisiä oksia. Hyypä ym. (2009a) ja Kaasalainen ym. (2010) toteuttivat harsuuntumis- ja biomassamuutosmittauksen männylle käyttämällä TLS:ää. Vähentynyt pistemäärä antoi arvion harsuuntuneisuusasteesta ja puusta

sironneiden laserpisteiden lukumäärän muutos korreloi lähes täydellisesti ($R^2=0,99$) puun kokonaisbiomassamuutoksen kanssa lineaarisella mallilla. Holopainen ym. (2011a) ja Kankare ym. (2013a) mallinsivat mäntyjen ja kuusten kokonaisbiomassaa. Molemmissa tutkimuksissa TLS-pistepilvestä mitatut rungon ja latvuksen dimensiot korreloivat vahvasti puiden biomassan kanssa niin männyillä ($r=0,99$) kuin kuusilla ($r=0,98$). Kankare ym. (2013a) sekä Yu ym. (2013) kehittivät TLS-piirteisiin ja -mittauksiin perustuvia yksittäisten puiden TLS-biomassamalleja. Kankareen ym. (2013a) mukaan yksittäisten puiden biomassan suhteellinen RMSE oli kuusilla 11,9 % ja männyillä 12,9 %.

7.2 Puiden sijainnin määrittäminen maastolaserkeilauksesta

Puiden sijainnin määrittäminen maastolaserkeilauksesta on tulevaisuuden operatiivisen tulkintaprosessin ensimmäinen puustotulkintavaihe. On epätodennäköistä, että maastolaserkeilauksen tulkinta tulisi perustumaan aluepohjaisten menetelmien kaltaisiin kaukokartoitusprosesseihin. Todennäköisintä on, että pistepilvistä rekonstruoidaan puiden rungot. Tällöin yksittäisten puiden sijainnin tai pistepilvien klusterointi yksittäisiin puiden osalta on ensimmäinen tulkinnan vaihe.

Puiden sijainnin määrittämisessä käytetään muutamia perustekniikoita, jotka ovat puiden etsiminen 2D-tasosta (engl. 2D-layer searching technique), etäisyyskuvilta tai pistepilviltä. Puiden etsiminen 2D-tasosta toteutetaan esimerkiksi siten, että tietyllä korkeusvälillä olevat pisteet projisoidaan XY-tasoon. Puiden

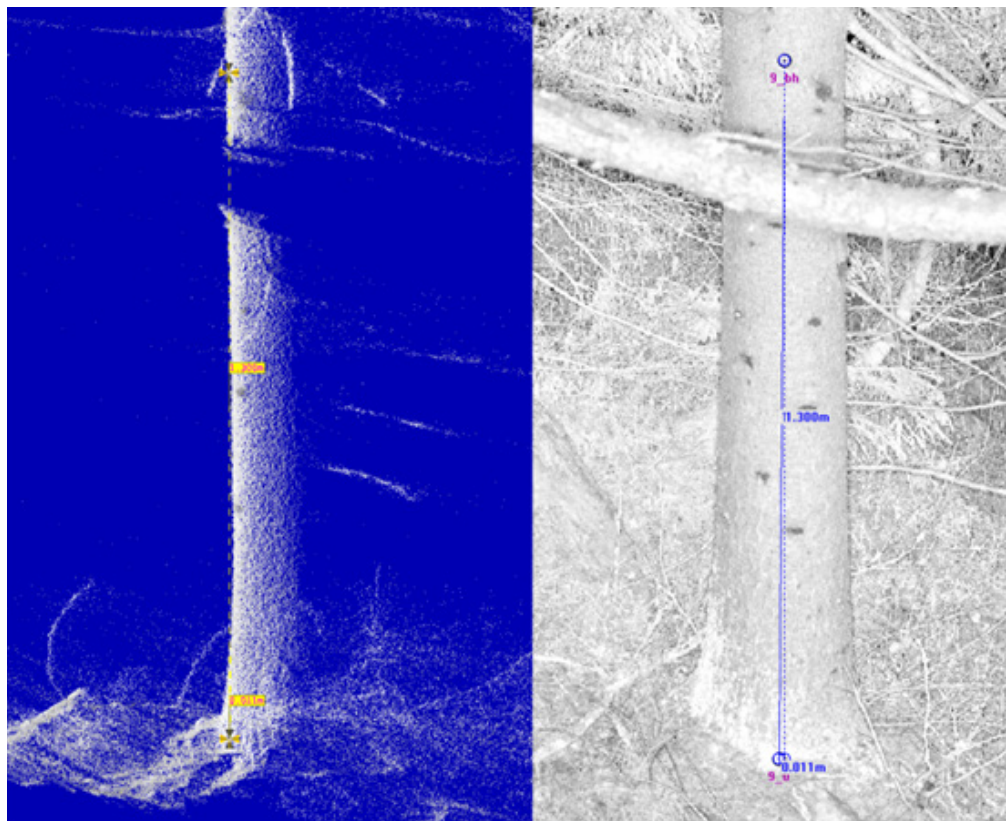
sijainti määritetään projisoidusta tasosta klusteroinnin, waveform-analyysin tai ympyrän etsimisalgoritmin (esim. Hough-muunnos) avulla. Tasoja voi olla myös useita. Koska prosessointi tehdään 2D-pistepilville, laskenta on melko nopeaa. Menetelmä toimii parhaiten mänty- ja koivuvaltaisissa metsissä, joissa 2D-taso on mahdollista leikata latvuksen alapuolelta, sillä oksien synnyttämät pistepilvet tuovat tulkintaan hajontaa. Menetelmä edellyttää korkeusmallin laskemista tai tasaista maastoa. Menetelmän etuna on, että rungon läpimitta saadaan laskettua yksijaksoisista puustoista melko suoraviivaisesti.

Etäisyyskuvapohjaiset menetelmät hyödyntävät paikallista naapurustoa. Etäisyysku-

via voidaan tuottaa jatkossa myös etäisyyskameroilla ja fotogrammetrisesti. Laskenta on tehokasta, koska data on kompressoitu 2D:ksi. Eri etäisyyksillä olevat puut erottuvat helposti. Etäisyyskuva vastaa teknologialtaan lentolaserkeilauksen latvuksen korkeusmallia (CHM), mutta laskenta toteutetaan vertikaalitasossa (horisontaalitasoon XY sijaan).

Pistepilvipohjaiset menetelmät ryhmittävät pisteitä naapurustossa ja laskevat naapuruston avulla tilastollisia suureita, joita käytetään tulkin apuna. Laskenta tehdään alkuperäiselle 3D-pistepilville, joten se on laskennallisesti vaativin menetelmä, mutta vastaavasti tietoa ei vähennetä kompressointiin 2D:ksi.

Tutkimuksen haasteena on löytää riittävä



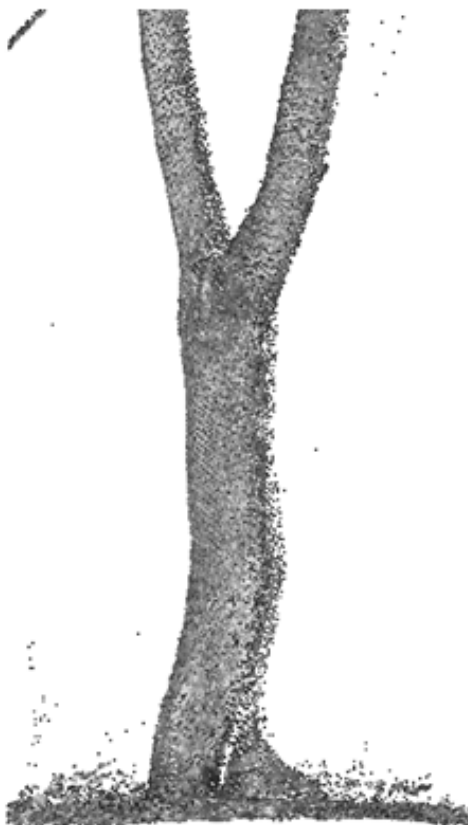
Kuva 23. Kuusen runko maastolaserkeilaimella kuvattuna. Vasemmalla pistepilvi kohtisuoraan keilaussuuntaa vasten katsottuna (yläosassa näkyy rungon ja keilaimen välissä olevan oksan aiheuttama katvealue) ja oikealla pistekuva suoraan keilaimelta nähtynä, jossa kunkin mitatun pisteen intensiteettiarvo (palaavan lasersignaalin voimakkuus) on kuvattu harmaasävynä. Kuvassa näkyy myös pistepilvestä manuaalisesti tehtyjä mittauksia (puun tyvi ja rinnankorkeus).

määrä puita automaattisesti pistepilvistä. Tosin pelkästään pistepilvien manuaalisella tulkinnallakin saavutetaan erittäin hyviä tuloksia, ja sen avulla voidaan siirtää merkittävä osa maastotyöstä tehtäväksi toimistossa. Puustokarttojen tuottamisesta on runsaasti tutkimustuloksia. Puiden löytyminen automaattisella tulkinnalla on riippuvainen puuston tiheydestä (Thies ja Spiecker 2004, Maas ym. 2008). Nykyisten algoritmien tasosta antaa ehkä parhaan kuvan Liang ym. (2011) tutkimus, jossa puista löydettiin 73 % puuston tiheyden ollessa 1022 runkoa/ha.

7.3 Läpimitan ja runkokäyrän mittaaminen

Perinteinen inventointi edellyttää rinnankorkeusläpimitan määrittämistä, maastolaserkeilauksen avulla olisi kuitenkin mitattavissa tai

estimoitaessa koko runkokäyrä. Runkokäyrän mittauksen ovat demonstroineet mm. Thies ym. (2004), Henning ja Radtke (2006), Maas ym. (2008) ja Liang ym. (2013). Henning ja Radtke (2006) mittasivat puiden runkoläpimittoja alle 1 cm tarkkuudella oksarajan alapuolella ja alle 2 cm tarkkuudella aina 13 m asti. Liang ym. (2011) mukaan rinnankorkeusläpimitan mittaustarkkuus (RMSE) automaattisella TLS-tulkinnalla oli 1,1 cm. Täytyy kuitenkin muistaa, että läpimittojen mittaustarkkuuteen vaikuttaa ratkaisevasti puun muoto (kts. kuvat 23 ja 24). Liang, ym. (2013) esittelivät automaattisen menetelmän runkokäyrän mittaamiselle TLS-pistepilvestä. Automaattisen runkokäyrämenetelmän avulla läpimitta mitattiin tutkimuksessa tarkemmin kuin manuaalisilla menetelmillä. Menetelmän tarkkuus (RMSE) oli männylle ja kuuselle keskimäärin 0,82 cm.

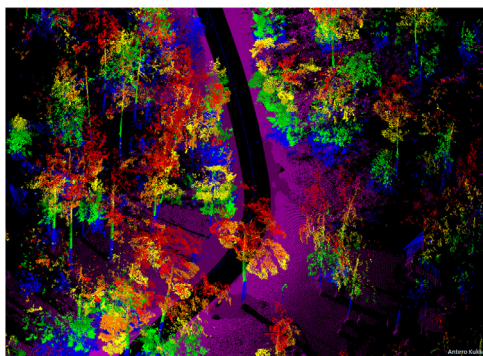


Kuva 24. Puun läpimitan TLS-/MLS-mittauksen ongelmia (Holopainen ym. 2013a).

7.4 Liikkuvan maastolaserkeilauksen mahdollisuuksia

Myös liikkuvan (mobile laser scanning, MLS) maastolaserkeilauksen, kuten autoon, mönkijään, moottorikelkkaan tai hakkuukoneeseen kiinnitettävien laserkeilainten mahdollisuuksia tutkitaan tällä hetkellä aktiivisesti (Lin ja Hyypä 2010, Lin ym. 2010, 2012, Holopainen ym. 2011b, 2013b) (Kuvat 19 ja 25). Jo lähitulevaisuudessa voidaan liikkuva maastolaserkeilaus nähdä potentiaalisena menetelmänä tuottaa karttaa kaupunkipuista. Holopainen ym. (2013b) saivat lupaavia tuloksia vertaillen maastolaserkeilauksella (TLS, MLS) ja lentolaserkeilauksella tuotettujen puukarttojen tarkkuutta sekä menetelmien tehokkuutta Helsingin kaupungin puistopuiden kartoituksessa (taulukko 2). Tulevaisuudessa hakkuukoneeseen sijoitettavalla laserkeilaimella olisi mahdollista tuottaa paikallinen puukartta, jota voitaisiin käyttää harvennushakkuilla kaadettavien puiden valinnassa, jäävän puuston arvioinnissa sekä runkojen optimaalisen katkonnan eli apterauksen tarkentamisessa. Liikkuva maastolaserkeilaus mahdollistaa nopean koealamittauksen, jopa useita kymmeniä koealoja päivässä.

Mobiili laserkeilain voidaan sijoittaa myös lennokkiin (kuva 26). Lennokista tehtävää laserkeilausta voidaan tällä hetkellä käyttää mm. muutostulkinta-aikaisarjojen tuottamiseen pienillä tutkimusalueilla ja uusien kartoituskonseptien tutkimiseen. Lennokki on erinomainen alusta



Kuva 25. Liikkuvaa laserkeilausta (mobil laser scanning; MLS, Vehicle based laser scanning; VLS) voidaan tehdä maastossa esimerkiksi mönkijään kiinnitetyn keilaimen avulla (vasen kuva). Alakuvassa on esitetty MLS-aineistoa, Seurasari. Kuvien © Antero Kukko/Harri Kaartinen (FGI).

yhdistää kustannustehokkaasti useampia kauko-kartoitussensoreita. Tulevaisuudessa lennokkiso-vellukset tulevat todennäköisesti valtaamaan alaa myös laajempien alueiden kartoitussovelluksissa.

Taulukko 2. Eri laserkeilausmenetelmien puiden paikannustarkkuus. TLSauto = automaattinen TLS-tulkinta, MLSauto = automaattinen MLS-tulkinta, MLSSemi = puoliautomaattinen MLS-tulkinta, MLSmanual = visuaalinen MLS-tulkinta, ALS_{ITDauto} = automaattinen ALS-yksinpuintulkinta, ALS_{ITDvisual} = visuaalinen ALS-tulkinta. Julkaisusta Holopainen ym. (2013b).

Menetelmä	puiden lukumäärä	keskimääräinen paikannusvirhe (m)	Stdev, m (m)	RMSE (m)
TLsauto	321	0,12	0,43	0,45
MLsauto	118	0,42	0,28	0,50
MLSSemi	192	0,36	0,25	0,44
MLSmanual	347	0,38	0,30	0,49
ALSITDauto	287	1,27	0,90	1,55
ALSITDvisual	298	1,27	0,93	1,57



K u v a 2 6 .
Lennokkiin (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) sijoitettu laserkeilain. Kuvan © Anttoni Jaakkola /Juha Hyypä (FGI).

8. Metsä- ja leimikkosuunnittelu

8.1 Puustotunnusten ennustaminen aluepohjaisella laserkeilausinventoinnilla

Metsäsuunnittelussa ollaan siirtymässä puustoinventoinnin osalta hyödyntämään aluepohjaista laserkeilausinventointia (kts. kpl 5.1). ABA:lla kuvioittaisten puustotunnusten ennustamisessa hyödynnetään tietolähteinä harvan pulssitiheyden laserkeilausaineistoa, digitaalisia ilmakuvia sekä tarkasti mitattuja ja paikannettuja maastokoealoja. Tarkkuudeltaan menetelmä on puulajitasolla vähintään yhtä tarkka kuin perinteinen kuvioittainen arviointi ja kokonaistunnusten osalta huomattavasti tarkempi.

Ensimmäisissä ABA-menetelmän tutkimuksissa ennustettiin yksittäisiä puustotunnuksia. Næset (1997a,b) ennusti kuvion puuston keskipituutta ja tilavuutta hyödyntäen korkeimpia laserkaikuja, jotka osuivat kuviolle sijoitetuille hilaruuduille. Kaikkien laserkaikujen käyttäminen puuston pituuden ennustamisessa aiheutti systemaattista aliarviota. Magnussen ja Boudewyn (1998) puolestaan laskivat laserpisteiden korkeusjakaumasta prosenttipisteitä, joiden avulla ennustivat puuston pituutta. Hyypä ja Hyypä (1999) ennustivat

kuvion puustotunnuksia regressiomalleilla käyttäen aluepohjaisia piirteitä selittäjinä. Mallinnuksessa huomioitiin maanpinnan korkeusmalli. Menetelmä oli parannus Næsetin (1997a) esittämälle, koska piirteinä voitiin näin käyttää todellisia puun pituuteen liittyviä suureita. Tutkimuksessa verrattiin myös laserkeilauksen tarkkuutta jo käytössä oleviin optisiin aineistoihin ja todettiin laserkeilauksen olevan ylivoimainen tarkkuudeltaan.

Næset (2002) esitteli operatiivisen ABA-menetelmän laatimalla aineistokohtaiset regressiomallit ennustettaville kuvion puustotunnuksille hyödyntäen laserpisteistä laskettuja latvuston korkeusjakaumapiirteitä ja laajaa koeala-aineistoa. Kehitetyillä regressiomalleilla laserpisteaineistosta laskettiin suoraan kuvion sisältämille hilaruuduille halutut tunnuksset, joista laskettiin edelleen kuvion puustotunnuksset. Ennustettujen puustotunnusten keskihajonta vaihteli ikä- ja kasvupaikka- luokittain. Vaihtelu oli keskipituudessa 0,61 m–1,17 m, keskiläpimitassa 1,37 cm–1,61 cm, pohjapinta-alassa 8,6–11,7 % ja tilavuudessa 11,4–14,2 %. Regressiomallit laadittiin 144 tarkasti puittain mitatun koealan avulla, ja puustotunnuksset ennustettiin 61 kuviolle.

Suomessa Suvanto ym. (2005) testasivat ABA-menetelmää ensimmäisen kerran metsävarojen inventoinnissa hyödyntäen 472 opetuskoealaa, joiden avulla ennustettiin

puustotunnukset 67 kuviolle. Regressiomalleilla ennustetut puustotunnusten suhteelliset RMSE-arvot olivat keskiläpimitalle, keskipituudelle, runkoluvulle, pohjapinta-alalle ja tilavuudelle, 9,5 %, 5,3 %, 18,1 %, 8,3 % ja 9,8 %. Tutkimuksessa saadut tulokset olivat tarkempia mitä kuvioittaisella arvioinnilla on useissa tutkimuksissa saatu (Poso 1983; Haara ja Korhonen 2004; Saari ja Kangas 2005; Vastaranta ym. 2010a).

Käytännön metsäsuunnittelussa tarvitaan puusto-ositteittaista tietoa (Packalén, 2009). Puulajiositteittaisten tunnusten ennustamisen aputietona laserpiirteiden lisäksi käytetään usein ilmakuvia (Packalén ja Maltamo 2007, Holopainen ym. 2008a). Packalén ja Maltamo (2007) ennustivat puulajeittaisia tilavuuksia käyttäen NN-menetelmää, laserpiirteitä ja ilmakuvia. Koeala- ja kuvioaineisto oli sama kuin Suvanto ym. (2005) tutkimuksessa. Kuvion puulajittaiset RMSE-arvot olivat 62,3 % lehtipuulle, 28,1 % männylle ja 32,6 % kuuselle.

Leimikkosuunnittelussa tarvitaan tietoa puulajeittaisista tukki- ja kuitupuun kertymistä sekä puuston laadusta. Tutkimusten referenssiaineistoksi tarvitaan tarkat kuviotason tukki- ja kuitupuukertymät, joiden mittaaminen tapahtuu käytännössä hakkuukoneella. Aineiston kerääminen on melko työlästä, joten tähän mennessä on toteutettu vain muutamia tutkimuksia, joissa tarkasteltu kuviotason puutavaralajien estimointitarkkuutta. Korhonen ym. (2008) ennustivat tukkipuun kertymiä mänty- ja kuusivaltaisilla kuvioilla ABA-menetelmällä. Maastokoealoille, joita käytettiin menetelmän opetusaineistona, laskettiin tukkipuukertymät hyödyntäen runkokäyriä ja tukkivähennysmalleja. Hakkuukoneella mitattu kuviotason tukkipuunkertymä ennustettiin 18,0 % RMSE:llä. Peuhkurinen ym. (2008) ennustivat puulajeittaisia runkolukujakaumia ja tukkipuukertymiä ABA-menetelmällä. Tukkipuukertymät opetusaineistoon ennustettiin k-NN menetelmällä, eli valitsemalla tukkipuukertymä hakkuukoneella mitatuilta kuvioilta runkolukujakaumia vertailemalla. Kuvioittaiset tukkipuukertymät ennustettiin

32 % tarkkuudella (RMSE) kuuselle ja n. 65 % tarkkuudella männylle. Holopainen ym. (2010b) ennustivat puutavaralajien kertymiä vastaavilla aputiedoilla (ALS- ja ilmakuvapiirteet) ja menetelmillä (NN-estimointi) kuin Packalén ja Maltamo (2007). Kuviotasolla tukkipuun ennustustarkkuudet (RMSE) olivat 79,2 % (7,0 m³/ha), 33,6 % (35,5 m³/ha) ja 78,6 % (6,2 m³/ha), männylle, kuuselle ja koivulle. Tutkimuksessa ABA antoi hieman tarkemmat ennusteet puutavaralajien kertymille kuin perinteinen, maastomittauksiin perustuva kuvioittainen arviointi. Menetelmän tarkkuuden arvioinnissa käytettiin 12 avohakkuukuviota, joilta oli käytössä hakkuukoneen mittaustiedot (5400 runkoa, edellä mainituista tutkimuksista laajin aineisto).

Elävän latvuksen raja on tunnus, jonka avulla voidaan ennustaa puun laatua. Næset ja Økland (2002) ennustivat latvuksen alkamiskorkeutta laserkorkeusjakauman piirteillä 1,2–1,5 m tarkkuudella. Maltamo ym. (2010) testasivat useita eri menetelmiä määrittää latvuksen korkeus kuusikoissa hyödyntäen laserkeilausaineistoa. Latvuksen korkeus mitattiin suoraan hyödyntäen joko geometrisia piirteitä tai laserkorkeusjakauman muotoa ilman kalibrointiaineistoa, sekä mallintamalla latvuksen korkeus laserkorkeusjakauman piirteillä. Tutkimuksessa testattiin myös suorien mittaustapojen kalibrointia maastoaineistolla. Latvuksen korkeuden määrittystarkkuus (RMSE) oli parhaimmillaan 1,0–1,5 m.

8.2 Puutunnusten ennustaminen yksinpuintulkinnalla

ITD perustuu puiden tunnistamiseen pistepilvestä, jonka tuloksena saadaan suoraa tietoa metsikön puiden kokojakaumasta. Hyypä ja Inkinen (1999) tunnistivat pintamallia segmentoimalla 40–50 % puista, vastaavasti Persson ym. (2002) tunnistivat 71 % puista, jotka edustivat 91 % puuston tilavuudesta. Pintamallia segmentoimalla havaitaan parhaiten valtapuut (Kaartinen ja Hyypä 2008). Tämän takia metsikön rakenteella on merkittävä vaikutus puiden tunnistamiseen ja puiden tunnistustarkkuus

onkin vaihdellut metsikön rakenteesta riippuen n. 40 %:sta lähes kaikkien puiden löytymiseen (mm. Pitkänen ym. 2004, Peuhkurinen ym. 2007, Yu ym. 2011, Vauhkonen ym. 2013a). Puiden tunnistuksen tarkkuus riippuu myös käytetystä puiden tunnistusalgoritmista, kun taas pulssitiheyden vaihtelun (2–8 pulssia/m²) merkityksen on todettu olevan vähäisempää (Kaartinen ja Hyyppä 2008, Kaartinen ym. 2012).

Tutkimuksia yksittäisen puun pituuden mitaustarkkuudesta on tehty runsaasti (Hyyppä ja Inkinen 1999, Persson ym. 2002, Næsset ja Økland 2002, Gaveau ja Hill 2003, Leckie ym. 2003, Maltamo ym. 2004, Rönnholm ym. 2004, Brandtberg ym. 2003). Hyyppä ja Inkinen (1999) raportoivat keskimäärin 14 cm aliarvion, kun taas Persson ym. (2002) raportoivat 1,1 m aliarvion. Gaveau ja Hill (2003) saivat 1,27 m aliarvion lehtipuille. Leckie ym. (2003) oletti, että osa 1,3 m aliarviosta selittyy aluskasvillisuudella. Yu ym. (2004a) raportoivat, että lentolaserkeilaimella mitatun puun pituuden arvioimisessa esiintyi 0,54–0,67 m systemaattinen aliarvio, joka vastasi puiden 2–3 vuoden kasvua. Korkeusmallin yliarvio (johtuen aluskasvillisuudesta) oletettiin olevan noin 0,20 m. Maltamo ym. (2004) raportoivat 65 cm aliarvion yksittäisille männyille käyttämällä takymetrimittauksia referenssinä.

Yu ym. (2004b) tutkivat lentokorkeuden vaikutusta yksittäisen puun pituuden arvioimiseen pohjoisissa havumetsissä 33 koealalla usealla eri puulajilla. Tulokset osoittivat, että keskivirhe suureni 0,76 metrissä 1,16 metriin, kun lentokorkeus nousi 400 metrissä 1,5 kilometriin. Samalla havaittavien puiden määrä laski. Pistetiheydellä näytti olevan suurempi vaikutus puun pituusarvioon kuin keilan koolla, ja havupuut olivat herkempiä lentokorkeuden muutoksille kuin lehtipuut. Persson ym. (2002) tutkimusten mukaan keilan koolla ei ole suurta merkitystä puun pituuden mittaukselle keilan kokoalueella 0,26–2,08 m. Nilsson (1996) ei havainnut keilan koon vaikuttavan puiden pituuden mittaamiseen mäntyvaltaisessa metsässä. Aldred ja Bonnor (1985) raportoivat pituustulosten kasvavan kei-

lan koon kasvaessa. Næssetin (2004) mukaan ensimmäisen pulssin avulla saatavat puun pituudet ovat suhteellisen vakaita keilan ollessa 16–26 cm kokoinen. Samoin Goodwin ym. (2006) todistivat eukalyptusmetsissä tehdyillä kokeilla, ettei lentoalustalla ja keilan koolla ole suurta vaikutusta puuston korkeusarvioon.

Metsäsuunnittelussa tarvitaan puulajittaista tietoa. Holmgren ja Persson (2004) luokittelivat männyt ja kuuset yli 90 % tarkkuudella tiheäpulsisella aineistolla puulajien rakenteellisten erojen avulla. Viime vuosina on saatu lupaavia tuloksia yhdistämällä tiheäpulsista laserdataa, ilmakuvia ja laserintensiteettiä. Holmgren ym. (2008) hyödynsivät laserin korkeusjakaumaa, latvuksen muotoa ja sävyarvopiirteitä ja luokittelivat puulajin 96 % tarkkuudella. Vauhkonen ym. (2010) käyttivät erittäin tiheäpulsista laseraineistoa (40 pulssia/m²) ja saavuttivat 95 % luokitustarkkuuden hyödyntäen latvuksesta laskettuja geometrisia piirteitä (alpha-shape). Vastaava menetelmä tuotti 78 % luokitustarkkuuden laajemmalla testiaineistolla ja käytännöllisemmällä pulssitiheydellä (6–8 pulssia/m²). Korpela ym. (2010) hyödynsivät laserin intensiteettiä ja saavuttivat 88–90 % luokitustarkkuuden kolmelle puulajille.

Yksittäisen puun tasolla tärkein tunnus on rinnankorkeusläpimita, josta runkomuoto, tilavuus ja puutavaralajien kertymät ennustetaan. ITD-menetelmällä saadaan suoraan tietoa puun pituudesta ja latvuksen läpimitasta, ja näiden tunnusten avulla on ennustettu läpimittaa (Kalliovirta ja Tokola, 2005). Pituuden ja läpimitan välinen allometrinen suhde ei ole yhtä vahva kuin läpimitan ja pituuden. Tästä syystä ennustettaessa läpimittaa pituuden avulla syntyy merkittävää epävarmuutta. NN-menetelmillä on pystytty tarkentamaan yksittäisen puun ominaisuuksien ennustamista (Maltamo ym. 2009, Vauhkonen ym. 2010, 2013a, Yu ym. 2011). Maltamo ym. (2009) ennustivat männyn laatutunnuksia k-MSN-menetelmällä käyttäen aputietona ALS-aineistosta irrotettuja puu- ja puustotason piirteitä. Läpimitan, pituuden, tilavuuden ja latvusrajan suhteelliset RMSE:t olivat 5,2 %, 2,0 %, 11 % ja 7,1 %.

Toisin sanoen tutkimuksessa osoitettiin, että NN-menetelmillä pystytään ennustamaan luotettavasti perinteisten puutunnusten lisäksi myös latvusrajaa, joka on teollisuudelle tärkeä laatutunnus. Maltamo ym. (2009) tutkimus perustui pieneen määrään manuaalisesti / puoliautomaattisesti rajattuja puita, joten tulokset edustanevat saavutettavissa olevan tarkkuuden ylärajaa.

ITD:n ja hakkuukoneella kerätyn puunlaatuaineiston yhdistäminen voisi parantaa puutavaralajien ennustustarkkuutta. Mikäli ITD- ja ABA-menetelmissä käytetään sama määrä maastomittauksia koealatasoisten tulosten kalibrointiin, saavutetaan ITD:llä tarkempia tuloksia kuin ABA-menetelmällä (Yu ym. 2010, Breidenbach ym. 2010).

8.3 Metsäsuunnittelussa tarvittavan runkolukusarjan muodostaminen

Metsäsuunnittelun simulointilaskenta perustuu metsiköstä mitattuun tai estimoituun runkolukusarjaan. Runkolukusarja voidaan muodostaa usealla eri tavalla. Perinteisessä kuvioittaisessa arvioinnissa runkolukusarja muodostetaan teoreettisesti esimerkiksi weibull-jakaumaan perustuen. Lähtökohtana on kuviolle edustaviin kohtiin mitatut relaskooppikoealat, joilta on määritetty läpimitaltaan keskimääräinen puu (mediaanipuun). Mediaanipuun määrittäminen tapahtuu yleensä silmävaraisesti, mikä on yksi kuvioittaisen arvioinnin virhelähteistä. Mediaanipuusta mitataan pituus, jota voidaan käyttää pituusmallin laadinnassa. Pituusmallista saadaan kullekin läpimittaluokalle pituus, jonka jälkeen on mahdollista laskea puu- ja metsikkökohtaiset tilavuudet.

Laserkeilauksen perustuva ABA-menetelmä tarjoaa uusia mahdollisuuksia, mutta myös haasteita metsäsuunnittelulaskennalle, sillä esimerkiksi kuvion runkolukusarjan muodostamiseen on useita vaihtoehtoja. Toistaiseksi operatiivisessa käytössä estimoidaan ensin puuston keskitunnukset ja sen jälkeen runkolukusarjat muodostetaan perustuen yleisiin teoreettisiin malleihin, esim. Weibull-jakaumaan. Otosyksikön laserpiirteitä voidaan käyttää myös

paikallisten runkolukusarjojen parametrien ennustamisessa (Gobakken ja Næsset 2004, Maltamo ym. 2006) tai kuvion runkolukusarjan muodostamisessa voidaan hyödyntää suoraan tulkinnan maastoreferenssinä käytettyjä maastokoealojen todellisia runkolukusarjoja (mm. Packalén ja Maltamo 2008).

Suomen yksityismetsissä ollaan parhaillaan siirtymässä menetelmään, jossa ABA-inventointi toteutetaan esimerkiksi 16 m x 16 m rasterisoluille, joille estimoidaan puustotunnukset perustuen ei-parametriseen k-NN- tai k-MSN-estimointiin. Tällöin runkolukusarjat olisi mahdollista muodostaa kullekin rasterisolulle erikseen, jolloin pystyttäisiin paremmin tarkastelemaan kuvion sisäistä hajontaa. Laskennan raskauden vuoksi on ainakin toistaiseksi päädytty ensin keskiarvoistamaan rasterisolujen tiedot kuviotasolle ja tekemään runkolukusarjan muodostaminen perinteisesti kuviotasolla. Rasterisolun sijaan suunnittelun otanta-/laskentayksikkönä on mahdollista käyttää esimerkiksi automaattisella segmentoinnilla tuotettuja pienkuvioita.

ITD:n suurin etu ABA-menetelmään verrattuna on, että ainakin suurin osa runkolukusarjasta saadaan todellisista mittaustuloksista. Pienemmät puut jäävät tulkinnassa helposti näkymättömiin, mutta ne voidaan ottaa huomioon teoreettisten runkolukusarjojen avulla (mm. Maltamo ym. 2004). Toinen vaihtoehto on kalibroida puuttuvien puiden tuottama systemaattinen aliarvio maastomittausten avulla (Vastaranta ym. 2011d).

Puukauppa perustuu leimikkosuunnitteluun. Kuvioittaisen arvioinnin tai aluepohjaisen laserkeilausinventoinnin tarkkuus puutavaralajien kertymien ennustamisessa ei riitä (Holopainen ym. 2010b), vaan edelleen tarvitaan erillistä leimikkosuunnittelua. Yksinpuintulkinta on parhaimmillaan järeissä uudistuskypsissä metsikoissa ja sillä on saatu lupaavia tuloksia leimikon ennakkomittauksesta. Peuhkurinen ym. (2007) ennustivat kahden leimikon puutavaralajien kertymät yksinpuintulkinnalla. Yksinpuintulkinnan tuloksia verrattiin hakkuukoneella mitattuihin todellisiin puutavaralajien kertymiin. Puiden lukumäärän ennuste oli n. 3–20 %

aliarvio, mutta tukkiosuuden tilavuuden ennuste poikkesi molemmilla leimikoilla alle 1 % hakkuukonemittauksesta. Holmgren ym. (2012) käyttivät hakkuukoneella mitattuja runkokäyriä yksinpuintulkinnan opetusaineistona ja raportoivat 25 m³/ha (10,6 %) virheen alikuviotason kokonaistilavuuden ennustuksessa.

8.4 Metsävaratietojen päivittäminen

Suomen metsäorganisaatioista metsähallitus ja metsäyhtiöt ovat siirtyneet suunnittelussaan jatkuvaan ajantasaistukseen. Myös yksityismetsien metsävaratiedon keruussa ollaan siirtymässä perinteisestä noin kymmenen vuoden syklissä tehtävästä suunnitteluinventoinnista metsävaratiedon ajantasaistukseen, jossa keskeisessä roolissa on lentolaserkeilaukseen perustuva inventointi. Jatkuva ajantasaistuksessa lähtötietoina toimivat kuvioittaisella arvioinnilla kerätyt inventointitiedot. Inventoinnin jälkeen metsän kehitys ja tehtyjen toimenpiteiden vaikutus kuvataan simuloimalla metsän kasvua malleilla. Tulevaisuudessa ajantasaistusta voidaan tehdä myös tiheästi (esim. joka toinen vuosi) toistuvilla kaukokartoitusinventoinneilla.

8.5 Toimenpiteiden ajoittaminen ja seuranta

Kuvioittaisessa arvioinnissa jokaiselle kuviolle määritetään seuraavan kymmenvuotiskauden toimenpidetarve. Määritettävät toimenpiteet vaihtelevat uudistamisesta päätehakkuuseen. Toimenpiteiden ajoitus vaihtelee kiireellisestä lepoon. ABA-menetelmää käytettäessä toimenpiteet määritetään edelleen maastossa. Laserkeilauksen hyödyntäminen myös metsikön toimenpidetarpeen määrittämisessä ja ajoittamisessa parantaisi metsäsuunnittelun tehokkuutta (Närhi ym. 2008, Vastaranta ym. 2010b, Vastaranta ym. 2011a). Närhi ym. (2008) tutkivat harvapulssisen (0,5 pulssia/m²) laserkeilausaineiston soveltuvuutta vartuneiden kuusen taimikoiden inventointiin ja taimikonhoitotarpeen määrittämiseen. Taimikonhoidon kiireellisyys luokiteltiin 71,8

% tarkkuudella suoraan laserpisteaineistosta diskriminanttianalyysillä. Vastaranta ym. (2011a) määrittivät koelan harvennustarvetta seuraavalla kymmenvuotiskaudella. Kiireelliset kohteet löytyivät 83–86 % tarkkuudella ja kohteet, joita pitää harventaa seuraavan kymmenvuotiskauden aikana 70–79 % tarkkuudella käytetystä ennustusmenetelmästä riippuen. Vastaranta ym. (2011a) käyttivät tiheäpulssista (10 pulssia / m²) laseraineistoa. Käytännössä toimenpideyksikkö on kuitenkin joko kuvio tai pienkuvio.

Metsäsuunnittelu vaatii tuekseen luotettavaa ja ajantasaista tietoa metsävaroista. Laserkeilauksen soveltamista toimenpiteiden seurantaan ovat tutkineet Yu ym. (2004a) ja Melkas ym. (2009). Laseraineistoa hyödyntävillä muutostulkintamenetelmillä voidaan havainnoida jopa yksittäiset puut, jotka on harvennettu (Yu ym. 2004a) tai metsävaratieto voidaan päivittää hyödyntämällä tarkkaa laserinventointia ja hakkuukoneen keräämää tietoa (Melkas ym. 2009). Yu ym. (2004a) käyttivät ITD-menetelmää ja eri ajankohtien kolmiulotteisten latvustonpintamallien erotusmenetelmää harvennettujen puiden löytämiseen. 83 harvennetusta puusta löytyi automaattisesti 61, ja kaikki harvennetut valtapuut tunnistettiin. Vastaavaa menetelmää on sovelluttu myös lumituhojen paikallistamiseen (Vastaranta ym. 2012a). Melkas ym. (2009) tutkivat ABA:n ja ITD:n hyödyntämistä metsävaratiedon päivityksessä yhdistämällä inventointitiedot hakkuukoneella kerättyyn puutavaralajien kertymätietoon. Koelaitteiden tehdyssä tarkastelussa inventointien keskitilavuuksien tarkkuudet ennen hakkuuta olivat aluepohjaisesti 21,6 % (RMSE) ja ITD-menetelmällä 21,7 % (RMSE). Hakkuun jälkeen päivitetty puuston tilavuuden RMSE kasvoi aluepohjaisesti 29,4 %:iin ja ITD-menetelmällä 31,6 %:iin. Absoluuttiset tilavuuden RMSE arvot vaihtelivat sekä ennen että jälkeen hakkuun 45,8–49,2 m³/ha. Tutkimuksen perusteella tarkan ALS-inventoinnin päivitys hakkuukoneella kerätyn tiedon avulla olisi varteenotettava vaihtoehto kuviotasolla. Ongelmat hakkuukoneella kerätyn tiedon yhdistämisessä yksittäisiin puihin estävät vielä sen käytön yksittäisen puun tasolla.

9. Ekologiset sovellukset

9.1 Kasvun ja kasvupaikkatunnusten ennustaminen

Laserkeilauksen tarkka geometria (10 cm XY-suunnassa, 5–20 cm Z-suunnassa) sopii hyvin puuston kasvun mittauksen (Yu ym. 2004a). Puiden kasvua voidaan määrittää laserkeilausaineistojen avulla usealla eri tavalla: eri ajankohtina mitattujen puiden pituuksien avulla (Yu ym. 2006), pintamallien (DSM) erotusten avulla (Yu ym. 2004a), eri ajankohtien aineistosta tuotettujen pituushistogrammien avulla (Næsset ja Gobakken 2005) tai yksittäisten puiden tilavuusestimaattien erotuksena (Yu ym. 2008).

Yu ym. (2004a) esittelivät laseraineistopohjaisen sovelluksen pituuskasvun mittaamiseen koeala- ja metsikkötasoilla käyttämällä kahdelta eri ajankohdalta löydettyjä samoja puita, joiden välille tehtiin muutostulkinta. St-Onge ja Vepakomma (2004) päättelivät puolestaan, että sensoreista riippuvat muutokset, kuten kaiun ilmaisimen menetelmä, ovat luultavasti vaikeimpia kontrolloida eriaikaisissa metsän kasvun analyysitarkoituksissa. Næsset ja Gobakken (2005) päättelivät, että kahden vuoden mittausperiodille sekä koealakohtainen että kuvioittainen muutos keskipituuden, pohjapinta-alan ja tilavuuden osalta on vaikea mitata tarkasti käyttäen aluepohjaisia piirteitä. He myös esittivät, että esim. maksimipituuspiirteet, eivät ole tarpeeksi stabiileja muutostulkintaan.

Yu ym. (2006) osoittivat, että yksittäisten puiden pituuskasvu voidaan mitata parhaimmillaan 0,14 m keskivirheellä käyttäen useampiaaikaisia ALS-aineistoja (10 pulssia / m²). Kasvumittausten tarkkuuden kannalta ratkaisevaa on ALS-kuvausten välinen aika, sillä Suomen hitaissa kasvuolosuhteissa yksittäisen vuoden kasvu on niin pieni, ettei sitä pystytä luotettavasti mittaamaan sen paremmin ALS-perusteisesti kuin perinteisillä maastomittausmenetelmillä. Yu ym. (2008) ja Hopkinson ym. (2008) päättelivät, että kasvun mittauksen luotettavuus paranee tarkasteltavan ajanjakson pidentyessä.

Laserkeilausaineistossa näkyvät metsän muutokset pitävät sisällään vertikaalisen ja horisontaalisen latvusten kasvun, neulasten ja lehtimassan vuodenaikavaihtelun, aluskasvilisyyden ja pensaskerroksen tilan sekä tuulen mukana liikkuvat, erityisesti korkeammat, puut. Käytetyn tekniikan tulisi kyetä erottamaan puiden kasvu muista metsässä tapahtuvista muutoksista.

Kasvupaikka voidaan määrittää ALS-inventoinnin avulla joko hyödyntäen pituusbonitointia (Holopainen ym. 2010e) tai kasvupaikkojen välisiä eroja laserpulssien korkeusjakaumissa (Vehmas ym. 2008, Vehmas 2011). Puuston pituuden mittaaminen on ollut ennen työlästä, mutta sekä ABA että ITD ovat parhaimmillaan puuston pituustunnusten mittaamisessa (mm. Hyypä ja Inkinen, 1999, Maltamo ym. 2004, Suvanto ym. 2005). Pituusboniteetin määrittämisen näkökulmasta ongelmallista on kuitenkin puuston iän määrittämismenetelmä.

Kuva 27. Profiili 150 m alueelta. Valkoinen, laserkeilaus vuodelta 2003; tumman harmaa, laserkeilaus vuodelta 1998. Kaadetut puut näkyvät vuoden 1998 aineistossa, mutta eivät vuoden 2003 aineistossa. Nuorten puiden kasvu on hyvin esillä profiilin vasemmassa osassa. Kuvan ©xiaowei Yu / Juha Hyypä (FGI).

Holopainen ym. (2010e) vertailivat harva-pulssiseen ALS-aineistoon perustuvia valta-pituuden määrittymenetelmiä sekä testasivat ALS-pituusbonitoinnin kautta estimoidun metsätyypin tulkintatarkkuutta viljelymetsiköiden ja luonnontilaisten metsiköiden pituusbonitoimintimalleilla. ALS-perusteista menetelmää verrattiin maastomittauksiin perustuvaan pituusbonitointiin. Maastoreferenssinä käytettiin Evon 102 koelaa, joille määritettiin metsätyypit maastossa. Pituusbonitoinnin onnistuminen on riippuvainen valtapituuden ja metsikön iän määrittämistarkkuudesta. Tutkimuksessa tarvittava metsikön ikätieto otettiin metsäsuunnitelmasta. Tutkimuksessa selvitettiin myös pituusbonitoimintimallien herkkyyttä ikätiedon tarkkuudelle. Tutkimuksen tulosten perusteella ALS-pituusbonitointi onnistui varttuneissa, yhden puulajin metsiköissä hyvin. Metsätyyppien luokitustarkkuudeksi saatiin n. 70 % (5 metsätyyppiä). Menetelmä on kuitenkin herkkä puuston iän määrittämisen virheelle, etenkin viljelymetsiköiden pituusbonitoimintimalleja käytettäessä. Pituusbonitoimintimalleja pitäisikin kehittää tarkemmiksi ja paremmin ALS-inventointiin sopiviksi. Holopainen ym. (2010e) tutkimuksen keskeinen päätelmä oli myös se, että tulevaisuudessa useampiaikaisten ALS-aineistojen yleistyessä kasvupaikkojen bonitointi tai olemassaolevien kasvumallien paikallinen kalibrointi voitaisiin perustaa puuston kasvun suoraan ALS-perusteiseen mittaukseen.

Vehmas ym. (2008) estimoivat kivennäismaan metsätyyppejä (5 luokkaa) NN-estimoinnilla Kolin kansallispuistossa. ALS-pulssitiheys oli keskimäärin 3,9 pulssia / m². Menetelmän lähtökohtana oli, että erilaiset metsätyypit tuottavat erilaisen laserpulssien korkeusjakautuman. Syynä tähän arveltiin olevan esimerkiksi lehtipuun määrän lisääntyminen rehevimmillä kasvupaikoilla. Parhaaksi kokonaisluokitustarkkuudeksi saatiin 58 % ja yksittäiselle luokalle 73 %. Vehmas ym. (2008) päättelivät, että menetelmän yhtenä ongelma-kohtana on subjektiivinen metsätyyppien maastoinventointi, jolloin referenssimittausten virheet voivat olla suurempia kuin ALS-tulkinnan virhe.

Pituusbonitointi on suora menetelmä kasvupaikan puuntuotoskyvyn määrittämiseen. ALS-perusteinen metsien inventointi mahdollistaa pituusbonitoinnin toteuttamiseen ja hyödyntämiseen käytännön operatiivisessa metsäsuunnittelussa, metsäkiinteistöjen taloudellisen arvonmäärittämisessä sekä ekologisesti tärkeiden kasvupaikkojen kartoituksessa. ALS-estimointimenetelmä, metsikön iän määrittämismenetelmä sekä pituusbonitoimintimallien toiminta vaatisivat kuitenkin vielä lisätutkimuksia.

Luonnon monimuotoisuuden kartoituksessa avainbiotooppien, kuten rehevien kasvupaikkojen, harvinaisten puulajien ja lahoppuuston löytäminen olisi tärkeää. Holopainen ym. (2010e) löysivät rehevät kasvupaikat (Omat, OMT) 81,5 % tarkkuudella. Vehmas ym. (2009) puolestaan erottelivat NN-menetelmällä reheviä kasvupaikkoja (OMaT, OMT) muista metsätyypeistä 88,9 % luokitustarkkuudella.

Kasvupaikkojen laserkeilaukseen perustuvaa tulkintaa on tutkittu myös soilla. Korpela ym. (2009) selvittivät suokasvillisuuden ja suokasvupaikkojen kartoituksen mahdollisuuksia korkeapulssisen (pulssitiheys n. 10 pulssia/m²) laserkeilausaineiston avulla. Tutkimuksen päätelmissä todettiin, että sekä korkeusjakaumapiirteiden että laserintensiteetin avulla voitiin kartoittaa avosuon habitaatteja hyvällä tarkkuudella, joskin laserpiirteisiin perustuvat habitaatti- ja kasviluokitusmallit tarvitsevat tuekseen paikallista kalibrointiaineistoa.

9.2 Puuston biomassan ja metsätuhojen inventointi

Metsiin sitoutuvan hiilen määrä (hiilitase) on tällä hetkellä keskeinen ilmastopoliittinen kysymys maailmanlaajuisesti. Suuri osa metsien hiilivarastosta koostuu puuston biomassasta. Perinteisesti puuston biomassaa on laajoilla alueilla estimoitu satelliittikuvatulkintaan perustuen. Puuston biomassa korreloi vahvasti puiden pituuden kanssa, joka voidaan määrittää tarkasti laserkeilaukseen perustuvilla menetelmillä (Kellndorfer ym. 2010). Lasermittaukset

ovat myös erinomainen kasvu- ja biomassamallien lähtökohta: maasto- ja lentokonelasermittausten avulla saadaan tarkkaa tietoa puiden latvuksista sekä puiden tilajärjestyksestä, joita on työlästä mitata perinteisin maastomittausmenetelmin. Voidaankin siis olettaa, että laserkeilauksen avulla on mahdollista tarkentaa olemassa olevia biomassan estimointimenetelmiä kaikilla tarkkuustasoilla yksittäisen puun biomassan määrittämisestä globaaleihin sovelluksiin. Ilmastonmuutoksen myötä myös metsätuhoihin liittyvät riskit, kuten kuivuus-, lumi-, myrsky-, ja hyönteistuhot ovat lisääntyneet. Yksityiskohtainen kaukokartoitus (laserkeilaus, ilma- ja spektrometrikuvat) mahdollistavat myös tuhojen inventoinnin ja seurannan sekä lähtökohdan tuhojen syiden analysointiin spatiaalisen tilastotieteen ja paikkatietojärjestelmien keinoin.

Yksittäisten puiden biomassan mittaamista laserkeilaukseen perustuen on tutkittu vielä melko vähän. Tämä johtuu siitä, että tutkimukset vaativat maastoreferenssiksi puita, joista on tehty tarkka, aikaavievä puuanalyysi. Aiheeseen liittyviä pioneeritutkimuksia ovat tehneet Holopainen ym. (2011a), Rätty ym. (2011), Kankare ym. (2013a, 2013b) sekä Yu ym. (2013). Kankareen tutkimuksissa selvitetiin maasto- ja lentolaserkeilauksen tarkkuutta yksittäisten puiden biomassan ennustamisessa. Aineistona käytettiin 64 osin laboratorioissa mitattua puuanalyysipuuta. Yksittäisten puiden biomassan ennusteet olivat etenkin maastolaserkeilauksen osalta erittäin lupaavia (RMSE % 11,9–12,9 %). ALS- ja TLS-menetelmillä pystytään mittaamaan hyvällä tarkkuudella puun biomassaositteita (runko-, oksat ja neulaset, kuva 28), mikä on tulevaisuudessa tärkeää kehitettäessä metsien biomass- ja bioenergiakartoituksia.

Laserkeilaukseen perustuva puuston biomassainventointi perustuu suoraan yhden ajankohdan aineistoon, kun taas kahden eri ajankohdan aineistojen avulla voidaan tarkastella biomassan muutosta. Puuston latvuserroksen aukkoisuus ja lehtialaindeksi vaikuttavat voimakkaasti laserpulssin läpäisevyyteen lehvästössä (Solberg ym., 2009).

kuva 28. Puun biomassaositteet TLS-mittauksella määritettynä (Kankare ym. 2013a). Kuvan © Ville Kankare.

Puuston biomassamuutoksia on estimoitu usein lehtipinta-alaindeksin (LAI, Leaf Area Index) muutosten avulla. LAI on mahdollista määrittää maastossa tarkoitukseen kehitetyn LAI-mittarin avulla. LAI-arvoja on estimoitu myös laserkeilauksen avulla (mm. Solberg 2008, Solberg ym. 2006, 2009, Korhonen 2011, Korhonen ym. 2011). LAI on yleensä mallinnettu laserilta määritetyn latvuspeittävyyden tai läpäisevyyden avulla. Solberg ym. (2009) raportoivat laserin kasvillisuuden läpäisevyyden ja maastossa LAI-mittarilla mitattujen arvojen välille selitysasteeksi 0,9.

Metsätuhojen havaitseminen ilmasta tehdyillä laserkeilauksilla voi perustua myös, kuten biomassamuutosten seuranta, LAI:n määrittämiseen laseraineistosta (Solberg 2008, Solberg ym. 2006, 2009). LAI-mittausten vaihtoehtona voidaan pyrkiä arvioimaan suoraan mielenkiinnon kohteena olevan tuhon suuruutta (Kantola ym. 2010, Vastaranta ym. 2012a, 2011b). Solberg (2008) tutki useampiaikaisten laserkeilausten käyttöä metsän hyönteistuhon seurannassa Norjassa suorittamalla kolme eriaikaista lentoa, joilla tuholaiskohteessa havaittiin mittausten välillä muutoksia lehtialaindeksissä. Solberg (2008) havaitsi, että laserkeilaukseen perustuva LAI-estimaatti oli korkeimmillaan ennen hyönteisten aiheuttamaa neulastuhoa (heinäkuu), josta arvot hieman nousivat luonnollisen kasvun myötä toukkien jo koteloiduttua (elokuu). Useam-

piikaisten keilausten tuottaminen samalle alueelle tihein väliajoin on operatiivisessa toiminnassa kallista. Solberg (2008) esittikin yhdestä keilauksesta tapahtuvaan metsän terveydentilan arviointiin indikaattoria, joka on laserdatasta mitatun lehtialaindeksin ja metsän puustotiheyden suhde.

Kantola ym. (2010) selvittivät ITD:n tarkkuutta mäntypistiäistuhojen (*Diprion pini* L., kuva 29) estimoinnissa yhden ajankohdan tiheäpulsisesta (10 pulssia/m²) laserkeilausaineistosta. Tutkimuksessa käytettiin apuna myös ilmakuvia. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, millä tarkkuudella suuren harsuuntumisasteen puut pystytään erottamaan terveistä puista. Estimointimenetelminä käytettiin logistista LASSO-regressiota sekä NN-menetelmiä. Tulosten perusteella luokitustarkkuus vaihteli estimointimenetelmästä riippuen 83,7–88,1 %. Päätelmänä oli, että yksittäisten puiden harsuuntumistasetta voidaan luokitella kohtuullisella tarkkuudella pelkästään yhden ajankohdan tiheäpulsiseen laserkeilausaineistoon perustuen. Vastaranta ym. (2013a) hyödynsivät samaa tiheäpulsista ALS-aineistoa kuin Kantola ym. (2010) ja testasivat aluepohjaista lähestymistapaa puuston harsuuntumisen estimoinnissa. Tuloksena oli, että harsuuntumista voidaan ennustaa kohtuullisella tarkkuudella (oikeinluokitusprosentti

84,3 %) kahden luokan (harsuuntunut – ei harsuuntunut) tapauksessa.

Vastaranta ym. (2012a) tutkivat useampiaikaisen, tiheäpulsisen (pulsstitehyys n. 10 pulssia/m²) ALS-aineiston tarkkuutta lumituhojen kartoituksessa (kuva 30). Laserkeilausaineistot olivat vuosilta 2006, 2009 ja 2010. Lumituhot tapahtuivat talvella 2009–2010. Tutkimuksessa kehitettiin pintamallien erotukseen perustuva tulkintamenetelmä (Δ CHM-menetelmä). Menetelmän toimivuutta testattiin kymmenellä pysyvällä metsikkökoelalla. Tuhoutuneen latvusalan koon estimointitarkkuudeksi todettiin –16,4 – 5,4 %. Vastaranta ym. (2012a) päättelivät, että Δ CHM on potentiaalinen menetelmä puuston 3D-rakenteessa tapahtuvien muutosten seurantaan, mikäli käytettävissä on useampiaikaista tiheäpulsista ALS-aineistoa. Vastaranta ym. (2011b) käyttivät edellisessä tutkimuksessa (Vastaranta ym. 2012a) hyödynnettyä tiheäpulsista, useampiaikaista ALS-aineistoa selvittäessään aluepohjaisen ALS-tulkintamenetelmän tarkkuutta lumituhojen estimoinnissa. Tutkimusaineistona käytettiin metsikkökoalaa (puulaji mänty), joka jaettiin 5m x 5m ruutuihin (n=85). Ruudut luokitettiin maastomittausten perusteella tuhoutuneisiin (n=43) ja terveisiin (n=42). Askeltavalla regressiotekniikalla tuhoutuneet rasteriruudut pystyttiin luokitamaan 78,6 %:n tarkkuudella



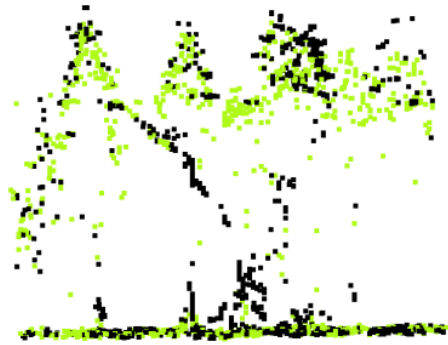
kuva 29. Pilkkumäntypistiäisiä (*Diprion pini* L., vasemmalla) ja niiden aiheuttamia puustotuhoja (oikealla), Palokangas, Ilomantsi. Kuvien ©Tuula Kantola / Päivi Lyytikäinen-Saarenmaa.



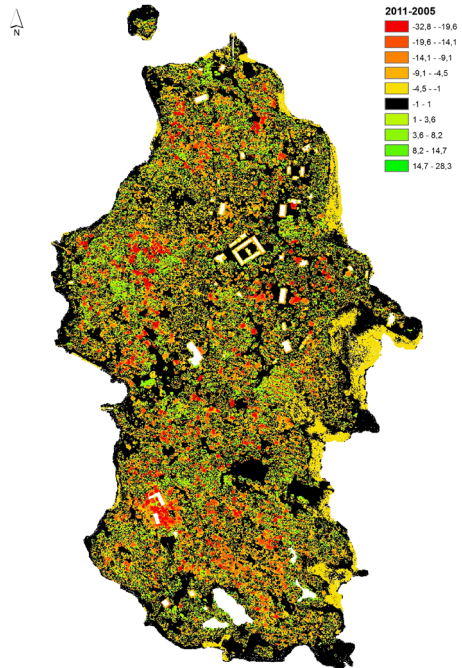
(Kappa 0,57). Vastarannan ym. (2011b, 2012a) tutkimusten perusteella voidaan päätellä, että luonnon häiriötekijöiden metsiin aiheuttamia muutoksia, kuten lumi- ja myrskytuhoja (kuva 31), on mahdollista inventoida useampiaikaisten laserkeilausten avulla (kuva 32).



Kuva 31. Lumi- (ylempi kuva) ja myrskytuhoja (alempi kuva) on mahdollista kartoittaa useampiaikaisten laserkeilausten avulla. Kuvan © Ville Kankare / Antti Uotila.



Kuva 30. Lumituhon taivuttamia latvuksia kahden eri ajankohdan (2007, vihreä; 2010 musta) laserkeilausaineistossa. Kuvasta voi havaita myös terveiden puiden kasvun. Kuvan © Mikko Vastaranta.



Kuva 32. Kahden ajankohdan (2005, 2011) laserkeilaukseen perustuva muutostulkintakuva. Seurasaari, Helsinki. Kuvan © Ville Kankare.

9.3 Monimuotoisuustunnusten ennustaminen

Monimuotoisuuden säilyttäminen on yksi metsien kestävän käytön periaatteista. Pesonen ym. (2008) inventoivat luonnontilaisten metsien lahoppuuston määrää laserkeilauksella. Tutkimuksessa laserkeilausaineisto osoittautui käyttökelpoiseksi lahoppuuston tilavuuksien ennustamiseen. Keskineliövirheet (RMSEt) maalahoppuuston, pystylahoppuuston ja kokonaislahoppuuston tilavuuksille olivat 51,6 %, 78,8 % ja 54,2 %. Laserpohjaiset lahoppuuston tilavuusennusteet osoittautuivat huomattavasti tarkemmiksi kuin lahoppuuston tilavuusennusteet elävän puuston tunnusten perusteella.

Laserkeilausta voidaan hyödyntää myös tehostamaan lahoppuuston maastoinventointia. Pesonen (2011) tutki laserpohjaisen lisäinformaation käyttöä parantamaan otantaa tehokkuutta. Laseraineistoa käytettiin joko otantavaiheessa hyödyntämällä otantaa otosyksikön koon mukaan tai käyttämällä lisäinformaatiota tunnusten estimointivaiheessa joko suhde- tai regressioestimoinnissa. Tutkimuksessa todettiin, että laserpohjaisen lisäinformaation käyttö oli tehokkainta verrattuna vanhaan metsikkökuvioaineiston tai ilmakuvien käyttöön lisäinformaationa.

Metsän latvuspeittävyys on toinen tärkeä ekologinen tunnus ja toimii perustana kansainväliselle metsän määritelmälle. Latvuspeittävyys määritellään latvuston pystysuuntaisen projektion peittämänä prosenttiosuutena määrätystä alueesta. Korhonen ym. (2011) käyttivät latvuspeittävyyden estimaattina rinnankorkeuden yläpuolelta heijastuneiden laserpulssien prosenttiosuutta ja totesivat menetelmän tuottavan miltei yhtä tarkkaa tietoa kuin maastomittaus Cajanuksen putkella. Käytännön inventoinneissa luotettava latvuspeittävyyesarvio pitäisi saada nopeasti laajoille alueille, jolloin laserkeilaus on käytännöllinen verrattuna hitaisiin ja kalliisiin maastomittauksiin.

Borealisissa mänty- ja kuusivaltaisissa havumetsissä, haapa (*Populus tremula* L.) on yksittäisenä puulajina merkittävä monimuo-

toisuuden kannalta. Erityisesti suuret haavat tarjoavat arvokkaita elinympäristöjä esimerkiksi liito-oraville. Säynäjoki ym. (2008) tunnistivat yksittäisiä haapoja muista lehtipuista laserkeilaus ja ilmakuva-aineistojen avulla. Latvukset segmentoitiin CHM:stä ja havupuut eroteltiin lehtipuista visuaalisesti ilmakuvien avulla. Tämän jälkeen haavat tunnistettiin muista lehtipuista diskriminanttianalyysillä. Haavat erottuivat muista lehtipuista 78,6 % tarkkuudella, kun analyysissä käytettiin laserkorkeusjakauman ja intensiteettijakauman piirteitä.

Vaihteleva latvuksen vertikaalirakenne tarjoaa monipuolisempia elinympäristöjä useille lajeille. Laserkorkeusjakauman piirteet kertovat suoraan latvuksen vertikaalirakenteesta. Yksijaksoinen latvus aiheuttaa erilaisen laserkorkeusjakauman muodon verrattuna useampikerroksiseen latvukseen. Vehmaksen ym. (2008) tutkimuksessa laserkeilausaineiston avulla selvitettiin lehtokuviodien tunnistamista. Tutkimuksessa lehtojen tunnistaminen perustui pääasiassa kasvillisuuden vertikaaliseen vaihteluun, joka on tunnuksenomaista lehdoille. Vehmas ym. (2011) tutkivat laserkeilauksen avulla eroja pienaukkojen sisällön vertikaalirakenteissa käsiteltyjen ja luonnontilaisten metsien välillä ja totesivat lisäksi, että kasvillisuuden tiheys ja maalahoppuun olemassaolo pienaukoissa ovat määriteltävissä laserkeilainaineiston avulla.

10 Laserkeilausinventoinnin tehostaminen

10.1 Laserkeilausotanta laajojen alueiden inventoinnissa

Laserkeilaus on melko arvokasta kaukokartoitusaineistoa, jos sitä verrataan satelliittikuviin. Näin ollen laajojen alueiden strategiseen suunnitteluun liittyvä metsien inventointi (VMI) perustuu Suomessa edelleen joko pelkästään maastomittauksiin (valtakunnan taso) tai maastomittauksen ja satelliittikuva-

tulkinnan yhdistämiseen (pienalueet). Laserkeilausta pyritään kuitenkin hyödyntämään kaiken aikaa laajemmilla alueilla. Yhtenä tavoitteena voidaan nähdä laserkeilauksen yhdistäminen tavalla tai toisella myös strategisen tason otantapohjaiseen metsävarojen inventointiin (VMI).

Laserprofiilien hyödyntämisestä otantapohjaisessa inventoinnissa on runsaasti kokemusta (mm. Nelson ym. 2003a, Nelson ym. 2003b, Nelson ym. 2004). Esimerkiksi Nelson ym. (2004) inventoivat Yhdysvalloissa Delawaren osavaltion metsät käyttäen 14 lentolinjaa ja 4 km otantaväliä. Puuston tilavuusennuste erosi US Forest servicen ennusteesta alle 21 % kunta- ja alle 1 % osavaltion tasolla. Vastaavat erot biomassaennusteissa olivat 22 % ja 16 %.

Holopainen ja Hyypä (2003) ja Naeset ym. (2006) ehdottivat menetelmiä laserkeilauksen käyttöön otantapohjaisessa kais-taininventoinnissa. Viime aikoina on julkaistu runsaasti tutkimuksia (mm. Gregoire ym. 2011, Ståhl ym. 2011) tästä potentiaalisesti kustannustehokkaasta inventointimenetelmästä. Gregoire ym. (2011) ja Ståhl ym. (2011) sovelsivat erilaisia otantateorioita Norjan Hedmarkin maakunnan biomassaestimoinnissa. Aineistona heillä oli VMI:n koealaverkosto, sekä linjoittaista ALS- ja laserprofiiliaineistoa. Kokonaisbiomassan osalta Gregoiren ym. (2011) ennusteet olivat hyvin lähellä maastokoealojen perusteella laskettuja ennusteita, mutta keskivirheet olivat huomattavasti suuremmat. Ståhl ym. (2011) tutkimuksessa ALS-perusteisen kais-taininventoinnin biomassaennusteiden keskivirheet olivat lähellä pelkkään koealaotantaan perustuvan menetelmän keskivirheitä, mutta ennusteet olivat yliarvioita. Molemmissa yllä mainituissa tutkimuksissa verrattiin myös laserprofiilien käyttöä laserkeilausaineistoon. Tulosten perusteella laserkeilaus vaikutti lupaavammalta menetelmältä. Wulder ym. (2012) ovat julkaisseet kattavan yhteenvedon otantapohjaisen laserkeilauksen hyödyntämisestä laajojen alueiden inventoinneissa.

10.2 Lentolaserkeilauksen yhdistäminen SAR-satelliittitutkakuvaukseen

Lentolaserkeilaus on pinta-alayksikköä kohden melko kallis kaukokartoitusmenetelmä verrattuna sitä satelliittikuvaukseen. Etenkin päivityssovelluksissa, joissa tietoa kaivataan esimerkiksi useamman kerran vuodessa, tarvitaan tulevaisuudessakin laserkeilauksen lisäksi myös muuta kaukokartoitusaineistoa. Erityisen mielenkiintoisia ovat halvat, hyvän temporaalisen resoluution aineistot, joita voitaisiin hyödyntää monivaiheisessa otannassa sekä muutosten seurannassa ALS-mittausten kanssa.

Keskiresoluution optisen aallonpituusalueen satelliittikuvia on käytetty metsien inventoinnissa jo pitkään (mm. Kilkki ja Päivinen 1987, Tokola 1989, Tomppo 1990). Huolimatta satelliittikuvien tuomasta merkittävästä lisäarvosta suuralueiden inventoinnissa, yksityiskohtaisessa kartoituksessa ja operatiivisessa metsäsuunnittelussa niitä ei ole pystytty ainakaan Suomessa hyödyntämään. Suurimpana syynä tähän on se, ettei keskiresoluution satelliittikuvien numeerisella tulkinnalla lukuisista yrityksistä huolimatta ole päästy riittävään kuviotason tarkkuuteen. Esimerkiksi keskitilavuuden suhteellinen RMSE on kuviotasolla tyypillisesti 55 %–60 % (mm. Hyypä ym. 2000), mikä ei ole riittävä tarkkuus operatiivista metsäsuunnittelua ajatellen. Koealatasolla keskivirheet ovat vielä huomattavasti korkeampia, eli 65 %–80 % (mm. Poso ym. 1999, Franco-Lopez ym. 2001, Tuominen ja Poso 2001). Tarkkuuden ohella toinen optisen aallonpituusalueen satelliittikuvien hyödyntämisen ongelma on kuvien hankinta pilvisissä olosuhteissa. Esimerkiksi Suomessa ei ole joka vuosi saatavilla koko maan kattavaa pilvetöntä satelliittikuvamosaiikkia. Tämä on merkittävä ongelma, varsinkin kun inventointitiedon päivittämiskiertoa halutaan kaiken aikaa nopeuttaa.

Rinnan LiDAR-profilimitausten kanssa kehitettiin 1980-luvun lopulla myös mikroatotutkatekniikkaan perustuvia profiloivia menetelmiä. Esimerkiksi Bernard ym. (1987)

raportoivat, että takaisin sironneen signaalin muodosta (kutsutaan nykyisin waveformiksi, eli aaltomuodoksi) voidaan määrittää sekä pituuteen että tiheyteen liittyviä puustotunnuksia. Suomessa profiloivien mikroaaltoinstrumenttien käyttöä puustotunnusten estimoinnissa tutkivat mm. Hyypä ja Hallikainen (1993) ja Hyypä (1993). Tuolloin mikroaaltotutkilla saavutettiin jopa tarkempia tuloksia kuin lasereilla. Esimerkiksi Nelson ym. (1988) R^2 ja Standard Error (SE) -arvot koealatasen keskitilavuuden estimoinnissa olivat profiloivalla LiDAR:illa 0,52 ja 69 m³/ha (36,2 %), kun Hyypän (1993) tutkimuksessa profiloivalla tutkakuvauksella vastaavat keskitilavuuden tarkkuutta kuvaavat estimaatit olivat 0,8 ja 45,6 m³/ha (20,4 %). Todennäköisesti suurin syy profiloivan mikroaaltotutkan parempaan tarkkuuteen oli sen suuremmasta keilanalasta (alue maanpinnalla, josta säteily heijastuu) johtuva kyky havaita puiden latvat. Lasermittauksissa keilan koko oli pienempi, jolloin puun latvan korkeinta pistettä ei varsinkaan harvapulssisella aineistolla havaita. Näin ollen puiden pituuteen tulee merkittävää aliarviota, eli harhaa. Myöhemmin laserkeilauksen pistetiheyden lisääntyminen on poistanut tätä ongelmaa. Mikroaaltotutkalla voitiin siis toteuttaa metsien full-waveform-tutkimuksia jo 1980-luvulla. Aaltomuotoon ja intensiteettiin liittyviä piirteitä olivat mm. latvuksen ja maakaiun kalibroitu sirontakerroin, aaltomuodon massakeskipiste, vinous ja leveys (Hyypä, 1993).

Tutkakuvien keskeisenä etuna optisen aallonpituusalueen kaukokartoituskuviin verrattuna on niiden saatavuus (temporaalinen resoluutio) kaikissa kuvausolosuhteissa. Tutkakuvaukseen, etenkin satelliitteihin sijoitetut SAR (Synthetic Aperture Radar) -tutkat, ovatkin mielenkiintoinen vaihtoehto kehitettäessä menetelmiä laajojen metsäalueiden muutostulkintaan.

Tutkakuvauksessa mitataan havaintolaitteen itsensä lähettämää säteilyä, eli kyseessä on aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä. Havainnointilaitteessa oleva lähetin lähettää toistuvia mikroaaltalueen säteilyimpulsseja tietyllä taajuudella. Laitteessa oleva vas-

taanotin puolestaan mittaa kohteesta takaisin siroavaa säteilyä. Sekä säteilyn lähetys että vastaanotto tehdään yleensä samalla antennilla, jonka avulla lähetettävä säteily suunnataan kaapeana keilana haluttuun suuntaan. Laitteistoon kuuluu tämän lisäksi tallennin, joka tallentaa takaisinsironneen signaalin. Tallennettu data käsitellään myöhemmin tietokoneella ja lopputuotteena on kohdetta esittävä kaksiulotteinen tutkakuva. Yksittäinen tutkakuva sisältää periaatteessa kolmenlaista informaatiota: 1) havaittu takaisinsironnan voimakkuus, 2) havaitun signaalin vaihe ja 3) etäisyys kohteeseen (lähetetyn ja vastaanotetun signaalin aikaeroa tutkimalla voidaan laskea kohteen etäisyys laitteistosta). Tutkat käyttävät sähkömagneettisen säteilyn mikroaaltosuuntaa, joka vastaa aallonpituuksia noin senttimetristä metriin. Näin ollen sääolosuhteet ja ilmakedä eivät häiritse tutka-aaltojen etenemistä, joten tutkan etuna optisiin havaintolaitteisiin verrattuna on sen kyky kerätä aineistoa myös pimeällä ja pilvisellä säällä. Tutkan havaitsemaan takaisinsirontaan vaikuttaa ensinnäkin kohteen ominaisuudet mutta myös tutkan ominaisuudet, esimerkiksi käyttämällä kuvauksessa eri mikroaaltojen taajuuskaistaa, säteilyn polarisaatiota tai kuvausgeometriaa saadaan kohteesta moniulotteista tietoa.

Seasat-satelliitti tuotti jo vuonna 1978 ensimmäiset keskiresoluution SAR-aineistot (spatiaalinen erotuskyky 25 m). 1980- ja 1990-luvuilla SAR-satelliittitutkia kehitettiin globaaleihin sovelluksiin, esimerkiksi laajojen alueiden metsäpinta-alan sekä biomassan estimointiin takaisinsironnan voimakkuuden avulla (mm. Le Toan ym. 1992, Rauste ym. 1994). Keskiresoluution SAR-kuvia on tutkimuksissa yritetty hyödyntää melko huonolla menestyksellä myös koeala- ja kuviotason puustotunnusten estimoinnissa. Esimerkiksi Hyypä ym. (2000) osoittivat, että SAR-kuvien takaisinsironnan avulla päästiin samaan tarkkuustasoon, mitä keskiresoluution optisen alueen satelliittikuvilla (Landsat TM). Kuviotason keskitilavuuden suhteelliseksi keskivirheeksi saatiin 57 %, mikä ei ole riittävä esimerkiksi operatiivisen metsäsuunnittelun näkökulmasta.

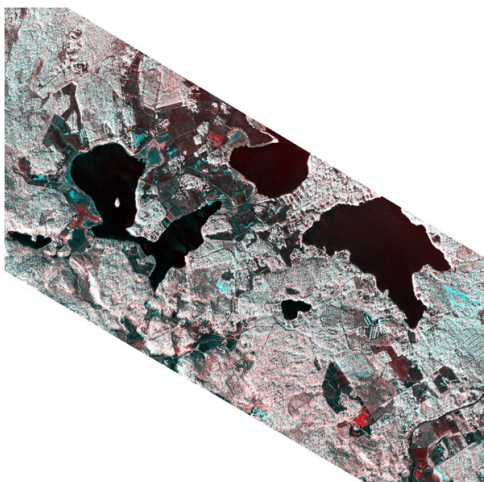
Nykyisin myös satelliittitutkat tuottavat metsistä varsin yksityiskohtaista tietoa, sillä viime vuosina on avaruuteen lähetetty useita satelliitteja, joiden spatiaalinen erotuskyky on 1–3 m. Esimerkiksi saksalainen TerraSAR-X –satelliitti (kuva 33) ja italialainen COSMO-SkyMed mahdollistavat parhaimmillaan noin 1 m maastoresoluution ja polarimetrian (polarisaatio = värähtelysuunta), stereokuvauksen sekä interferometrian (kahden tutkasignaalin vaihe-erojen määrittämisen). Hyvän resoluution ja monen kanavan avulla (monta taajuutta, polarisaatiota, mittauskulmaa, mittaushetkeä) tutkasatelliiteista saatetaan lähitulevaisuudessa saada myös metsätalouden kannalta arvokasta ja varsin tarkkaa tietoa. Erityisen mielenkiintoisia sovelluksia tutkakuvien hyödyntämisen näkökulmasta ovat laajojen alueiden metsävarojen seurantahankkeet.

Korkearesoluutioisten tutkakuvien intensiteettitiedon hyödyntämistä metsävarojen inventoinnissa on selvitetty useammassa tutkimuksessa joko yksin tai yhdessä laserkeilauspiirteiden kanssa (mm. Nelson ym. 2007, Tokola ym. 2007, Hyde ym. 2007 Holopainen ym. 2010f). Holopainen ym. (2010f) vertasivat aluepohjaisen ALS-inventoinnin ja korkean resoluution TerraSAR-X tutkakuvien takaisinsironnan voimakkuuden (intensiteetin) tarkkuutta puuston pohjapinta-alan, keskiläpimitan, keskipituuden ja keskitilavuuden koalatason estimoinnissa. Tulosten perusteella ALS-estimointi tuotti huomattavasti tarkemman tuloksen kaikkien puustotunnusten estimoinnissa kuin TerraSAR-X. Aineistojen yhdistämisellä päästiin puolestaan hieman tarkempaan tulokseen kuin ALS-aineistolla yksinään.

Holopaisen ym. (2010f) tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että 2D-tutkakuvapiirteillä (intensiteetti) voidaan saavuttaa sama tarkkuustaso kuin optisen aallonpituusalueen satelliittikuvien tai ilmakuvien 2D-tulkinnalla. Toisin sanoen laajoilla alueilla puuston keskitunnusten ennustamisen näkökulmasta tulokset ovat lupaavia, mutta yksityiskohtaisen kartoituksen, eli esimerkiksi metsäsuunnittelun, tiedon tuottamiseen korkean resoluutionkaan tutkasatelliittikuvat eivät näyttäisi yksinään soveltuvan.

Puustotunnusten estimointi pelkästään takaisinsironnan voimakkuutta hyödyntämällä on siis osoittautunut haasteelliseksi. Ensinnäkin havaittuun takaisinsirontaan vaikuttavat muut kuin metsän ominaisuudet, kuten maaston muodot ja kohteen kosteusolosuhteet, joiden huomioiminen on monimutkaista. Lisäksi metsän biomassan kohdalla tutkasignaali saturoituu jollakin biomassatasolla, jota suurempia tilavuuksia ei siis pysty havaitsemaan. Saturaatiotaso riippuu käytetystä tutkan aallonpituudesta. Ehkä lupaavin lähestymistapa metsän biomassan määrittämiseen tutkan avulla olisi puuston pituustiedon käyttö samoin kuin laserkeilauksessa. Periaatteessa tutkakuvilta on kaksi tapaa tuottaa 3D-korkeustietoa: 1) SAR-interferometria tai 2) radargrammetria. Tutka-aallonpituuksista soveltuvin puuston pituuden mittaukseen lieenee X-kaista, jolla sironta tapahtuu pääosin latvustossa toisin kuin pidemmällä aallonpituuksilla. SAR-interferometriassa tarvitaan kaksi SAR-kuvaa hieman eri kuvausgeometrioilla ja metsien tapauksessa kuvausten tulisi olla yhdenaikaisia, sillä muuten interferometria ei välttämättä onnistu. Yhtäaikaista interferometriaan soveltuvia SAR-kuvia (nk. single-pass SAR interferometry) on toistaiseksi saatu vain NASA:n SRTM-sukkulalennolta, jota on myös onnistuneesti käytetty metsien kartoituksessa (esim. Solberg ym., 2010). Toinen mielenkiinnon kohde on ns. radargrammetria, eli korkean resoluution tutkakuviin perustuva stereokuvaus (Karjalainen ym. 2012, Vastaranta ym. 2013b).

SAR-stereokuvaus (kuva 33) perustuu kahteen satelliittikuvaan, jotka on otettu kohteesta eri katselukulmilla (merkittävästi suurempi kulmaero kuin SAR-interferometriassa). SAR-stereomittaukseen soveltuvia korkean erotuskyvyn tutkakuvia on tällä hetkellä helposti saatavilla, mm. saksalainen TerraSAR-X, italialainen COSMO-SkyMed ja kanadalainen Radarsat-2. Kun SAR-stereokuvaparilta voidaan havaita vastinpisteitä, saadaan kyseisille pisteille laskettua 3D-koordinaatti eli korkeus. Metsien kohdalla vastinpisteet sijaitsevat yleensä jossakin maanpinnan ja latvuston välillä, X-kanavalla keskimäärin kuitenkin lähem-



Kuva 33. Vasemmalla korkean resoluution Terra-SAR-X –satelliittitutkakuvista tuotettu muutostulkinta ja oikealla Stereo-SAR –mittauksen periaate. Alkuperäiset kuvat DLR / Astrium GmbH.

pänä latvustoa. Radargrammetrian suurimpana etuna verrattuna perinteiseen takaisinsironnan voimakkuuteen verrattuna on siis tieto puuston korkeudesta.

Karjalainen ym. (2012) käyttivät korkearesoluutioista TerraSAR–stereokuvausta puustotunnusten estimointiin. Karjalaisen ym. (2012) tutkimuksessa käytetty maanpinnan korkeusmalli määritettiin ALS-tulkinnan avulla. Stereo-SAR–kuvauksen suhteellinen RMSE koelatasolla oli puuston tilavuudelle, pohjapinta-alalle, keskipituudelle ja keskiläpimitalle 34,0 %, 29,0 %, 14,0 %, and 19,7 %. Tulokset olivat huomattavasti parempia kuin aiemmissa metsien inventoinnin SAR-tutkimuksissa (mm. Holopainen ym. 2010f). Laajojen alueiden kartoituksen näkökulmasta radargrammetrian haaste on kattavan tiedon tuottaminen, sillä jos automaattinen vastinpiste-etsintä epäonnistuu, on aineistossa aukkoja. Kuitenkin lisäämällä stereokuvapareja aukkojen määrää saadaan vähennettyä.

Vastaranta ym. (2013b) jatkoivat Karjalaisen ym. (2012) tutkimusta vertailemalla aluepohjaisen ALS-inventoinnin sekä TerraSAR-X stereokuvauksen tarkkuutta puuston biomassan ja tilavuuden estimoinnissa. Tutkimuksen lähtökohtana oli pyrkimys kehittää kustan-

nustehokkaita menetelmiä puuston biomassan inventointiin ja seurantaan laajoilla alueilla. Tulokset olivat lupaavia: Puuston koelatasoinen biomassaestimaatin suhteellinen RMSE oli stereo-SAR –kuvilla 29,9 %, kun se ALS-estimoinnissa oli 21,9 %. ALS tuotti siis edelleen huomattavasti parempaa estimointitarkkuutta kuin korkearesoluutioinen SAR-aineisto. ALS- ja SAR-tulkinnan välinen tarkkuusero oli kuitenkin huomattavasti pienempi kuin aiemmissa tutkimuksissa (mm. Holopainen ym. 2010f).

Yhteenvetona edellä mainituista ALS- ja SAR-aineiston yhteiskäyttöön liittyvistä tutkimuksista voidaan sanoa, että ALS-tulkinnan ja korkean resoluution SAR–kuvauksen yhdistelmää voidaan pitää potentiaalisena menetelmänä metsävarojen inventoinnissa ja seurannassa ainakin laajojen alueiden soveluksissa. ALS- ja stereo-SAR –kuvauksen (ja mahdollisesti myös SAR-interferometrian) yhteiskäyttöä kehittämällä saatetaan päästä riittävään tarkkuuteen jopa kuviotasolla, jolloin menetelmällä olisi runsaasti sovelluskohteita metsävaratiedon yksityiskohtaiseen päivittämiseen liittyen.

10.3. Lentolaserkeilauksen ja ilmakuvauksen yhdistäminen

Metsien laserkeilausinventoinnin yksi keskeinen ongelmakohta on puulajitulkinta. Puulajia tarvitaan metsäsuunnittelulaskennan simulointimallien lähtötietona sekä esimerkiksi leimikkosuunnittelussa puutavaralajien ennustamisessa. Puulaji pystytään boreaalisissa metsissä ennustamaan hyvällä tarkkuudella (>80 prosentin luokitustarkkuus) pelkästään diskreetin laserkeilausaineiston perusteella, mikäli pulssitiheys on riittävän korkea (Vauhkonen ym. 2008, 2009, 2010, Vauhkonen 2010). Operatiivisessa metsäsuunnitteluinventoinnissa pulssitiheys on kuitenkin alhainen, joten puulajitulkinnan apuna käytetään ilmakuvista laskettua spektraalista ja teksturaalista tietoa (Packalén & Maltamo 2006, 2007, 2008, Packalén 2009).

Ilmakuvien täysimääräistä hyödyntämistä rajoittaa kuitenkin edelleen niiden radiometriaan liittyvät ongelmat (kts. kappale 1). Radiometriset ongelmat eivät kuitenkaan nykyisillä digitaalikameroilla ole yhtä suuria kuin aiemmilla filmikameroilla. Uusimmissa ilmakuvakameroissa radiometriset ongelmat voidaan poistaa lähes täysin jo kuvausvaiheessa suoritettavalla automaattisella korjausmenetelmällä. Markelin ym. (2010) tutkivat Leican ADS (Airborne Digital Sensor) –ilmakuvien radiometristen virheiden korjausketjua, ja totesivat sen toimivan erinomaisesti: korjauksen jälkeen radiometriset erot kuvan eri osiin sijoitetuilla säteilykohteilla olivat alle 5 %. Tulos oli erittäin lupaava, jos ajatellaan esimerkiksi ilmakuviin perustuvan automaattisen puulajitulkinnan tarkentamista.

Toinen potentiaalinen ilmakuvien ja laserkeilauksen hyödyntämismahdollisuus on pintamallien tuottaminen integroiduilla aineistoilla. Ilmakuvaus on suuremmasta kuvauskorkeudesta johtuen edelleen halvempaa materiaalia kuin laserkeilaus ja ilmakuvilla pystytään automaattisesti tuottamaan avoimessa maastossa lähes samaa tarkkuustasoa olevaa pintamallia kuin laserkeilauksellakin (st-Onge 2008 ym., Balsavias ym. 2008, Haala ym. 2010). Puuston tapauksessa ongelmana kuitenkin on, ettei

puuston alla oleva maanpinta näy ilmakuvilta kunnolla, jolloin latvuspeittävyuden lisääntyessä maastomallin tarkkuus heikkenee nopeasti. Näin ollen integrointi lähtee liikkeelle laserkeilauksella tuotetusta maastomallista, jonka jälkeen latvustomalli voidaan tuottaa tarvittaessa ilmakuvauksen avulla. Järnstedtin ym. (2012) mukaan puustotunnusten estimointi onnistuu tällä tavoin laserkeilausta ja ilmakuvasta yhdistävällä menetelmällä lähes yhtä tarkasti kuin pelkkään laserkeilausaineistoon perustuen. Yhden ajankohdan pintamallien tuottamisen ohella käytännön sovelluksena voisi olla myös muutostulkintamenetelmä, jossa lähtötietona käytettäisiin laserkeilaukseen perustuvaa pintamallia (esim. MML:n laserkeilausaineisto) ja puustossa tapahtuneet muutokset estimoitaisiin ilmakuviin perustuvan pintamallin avulla. Menetelmä olisi vastaava kuin laserkeilauksen ja SAR-tutkakuvauksen yhdistämisen tapauksessa (kts. kpl. 9.2).

11. Laserkeilausinventoinnin tarkkuuden merkitys metsäsuunnittelulaskennassa

11.1. Inventointitiedon arvo

Siirryttäessä uusiin inventointimenetelmiin, on tärkeää tietää, mikä on mitatun tiedon arvo metsäsuunnitteluun liittyvässä päätöksenteossa. Tätä näkökulmaa on tutkittu esimerkiksi käyttäen cost plus loss -analyysijä, jossa odotetut menetykset, jotka aiheutuvat epäoptimaalisista päätöksistä, lisätään metsäninventoinnin kokonaiskustannuksiin (Cochran 1977, Hamilton 1978, Burkhart ym. 1978, Ståhl 1994a, 1994b, Mäkinen ym. 2012). Cost plus loss -lähestymistapaa on viime vuosina hyödynnetty useissa tutkimuksissa myös tarkasteltaessa laserkeilausinventoinnin tarkkuuden merkitystä metsävarojen inventoinnissa ja metsäsuunnittelulaskennassa (mm. Eid ym. 2004, Holopainen & Talvitie 2006, Mäkinen ym. 2010).

Suurimmassa osassa metsien inventointiin liittyvistä ALS-tutkimuksista on keskitytty puuston keskitunnusten estimointiin (esimerkiksi keskitilavuus). Metsätaloudellisen tuottoarvon määrittämisen sekä operatiivisen puunkorjuun suunnittelun näkökulmista keskeistä kuitenkin on, kuinka puutavaralajikertymä pystytään ennustamaan. Esimerkiksi metsikön taloudellista arvoa ei pystytä määrittämään pelkän kokonaistilavuuden avulla, vaan tärkeää olisi tietää todellinen runkolukujakauma, jotta voitaisiin luotettavasti määrittää metsikön tilavuuden jakautuminen puolajiositteittain tukki- ja kuitu- ja energiapuuhun. Metsäsuunnitteluun liittyvässä hakkuukertymäennusteiden simuloinnissa puutavaralajien estimointiin vaikuttaa inventointivirheen lisäksi runkolukusarjan muodostamiseen liittyvät virheet sekä puiden runkomuodon ennustamiseen ja apteeraukseen liittyvät virheet. Näin ollen puutavaralajikertymän estimoinnin tarkkuutta on huomattavasti haastavampaa arvioida kuin puuston keskitunnusten estimoinnin tarkkuutta.

Metsänarvioimistieteellisissä kaukokartoitustutkimuksissa on perinteisesti keskitytty pienentämään jonkun keskeisen puu- tai puustotunnuksen, kuten kuviokohtaisen keskitilavuuden, estimoinnin keskivirhettä. Pääasia kuitenkin on, mikä on inventointitiedon tarkkuuden merkitys hyödynnettäessä sitä päätöstukijärjestelmissä. Kyseinen huomio oli lähtökohtana seuraavaksi tarkemmin esiteltävissä tutkimuksissa (Holopainen & Talvitie 2006, Holopainen ym. 2008a, 2010a,b,c,d, Holopainen 2011).

11.2 Laserkeilausinventoinnin tarkkuuden vaikutus hakkuiden ajoitukseen ja niistä saataviin tuloihin

Holopainen & Talvitie (2006) selvittivät metsien inventointitiedon arvoa metsäsuunnittelun simulointilaskennassa. Tutkimus toteutettiin cost plus loss -tarkasteluna, jossa metsien inventoinnin kustannuksiin lisätään kustannukset, jotka aiheutuvat epätarkan tiedon tuottamista epäoptimaalisten päätöksistä. Tutkimuksessa selvitettiin metsäsuunnittelun

simulointilaskennan lähtötietona käytettävän metsien inventointitiedon epävarmuuden vaikutusta hakkuutulojen nettonykyarvoihin sekä sitä, kuinka suuria hakkuutulojen menetyksiä epätarkasta lähtötiedosta aiheutui.

Tutkimusaineistona oli Helsingin kaupunkimetsät (700 ha), joista oli käytettävissä kaupungin luonnonhoitosuunnitelman kuvioietokanta. Kuvioittaisen arvioinnin lisäksi tarkasteltiin numeeristen ilmakuvien 2D-tulkinnan tarkkuutta sekä ilmakuvamittausten tai laserkeilauksen avulla tuotetun 3D-tulkinnan tarkkuutta. 2D-tulkinnalla tarkoitettiin menetelmää, jossa ilmakuvien automaattisella segmentoinnilla mitataan yksittäisten puiden latvusten läpimittoja. Latvuksen läpimittatietoa käytetään sen jälkeen selittävänä tunnuksena estimoitaessa puun rinnankorkeusläpimittaa. 3D-menetelmässä latvuksen läpimitan lisäksi on käytettävissä joko ilmakuvien tai laseraineiston fotogrammetrisen mittauksen kautta saatu puun pituus. Inventointimenetelmien tarkkuusarviot otettiin olemassa olevista tutkimuksista. Cost plus loss -tarkastelu toteutettiin MOTTI-simulaattorilla.

Metsäsuunnittelutiedon tuottamisen kustannuksena käytettiin tutkimuksen tekoaikaan vallinnutta kuvioittaisen arvioinnin kustannusta yksityismetsissä (17 €/ha). Tutkimuksessa arvioitiin, että puustotiedon tuottaminen suurimittakaavaisen (mittakaava 1:16 000 tai parempi) ilmakeu-aineiston tai korkeapuls-sisen laseraineiston (pulssitiheys > 5 pulssia / m²) tulkinnan kautta tulisi maksamaan yli 10 000 ha:n alueelle suurinpiirtein saman verran kuin perinteinen maastomittauksiin perustuva kuvioittainen arviointi. Ilmakeu- ja laserkeilaustulkinnassa huomioitiin aineistokustannusten lisäksi myös aineiston esikäsittelyn sekä puustotiedon mittaamisen tai estimoinnin kustannukset.

Holopaisen ja Talvitien (2006) tutkimuksen keskeisenä tuloksena oli, että metsäsuunnittelulaskennan lähtötiedon epätarkkuus aiheuttaa merkittäviä epäoptimaalisuustappioita väärin ajoitettujen hakkuiden vuoksi. Ilmakuvamittausten tai laserkeilauksen avulla tuotettu puittainen 3D-tieto pystyi kilpailemaan pe-

rinteisen kuvioittaisen arvioinnin kanssa. Sen sijaan 2D-tieto oli liian epätarkkaa aiheuttaen huomattavasti suurempia epäoptimaalisuustappioita kuin kuvioittainen arviointi tai 3D-tieto.

Tutkimuksen ongelmakohtana oli kaukokartoitukseen perustuvan inventoinnin kustannusten arviointi, sillä hehtaarikohtaiset kustannukset ovat pitkälti riippuvaisia inventoitavan alueen koosta. Mitä laajemmasta alueesta on kyse sitä pienempi hehtaarikohtainen kustannus. Lisäksi tekniikan nopea kehittyminen aiheuttaa kustannusarvioille oman haasteensa. Laserkeilaukseen käytettävät instrumentit kehittyvät nopeasti: esimerkiksi keilainten pulsitiheyden kasvaessa lentokorkeutta voidaan nostaa, jolloin hehtaarikohtaiset kustannukset pienenevät. Todennäköistä onkin, että tulevaisuudessa korkeapulssista laseraineistoa on saatavilla samaan hintaan kuin nykyisin matalapulssista. Toisaalta on muistettava, että myös kaukokartoitustulkinnassa suurin osa kustannuksista muodostuu aineiston käsittelystä sekä tarvittavan maastoreferenssin tuottamisesta. Tutkimus antoi joka tapauksessa esimerkin siitä, kuinka paljon lähtötiedon epävarmuus voi aiheuttaa hakkuutulojen menetyksiä. Menetysten osoittaminen antaa oikeutuksen myös taloudellisessa mielessä panostaa inventoinnin tarkkuuteen sekä lähtöaineiston, eli esimerkiksi laserkeilauksen laatuun.

Holopainen ym. (2010a) tutkivat inventointitiedon epävarmuuden vaikutusta hakkuiden ajoitukseen ja nettotulojen nykyarvoihin (NPV). Tarkastelussa keskityttiin nimenomaan yksittäisen puun ALS-inventointimenelmään (ITD), jota verrattiin perinteiseen kuvioittaiseen arviointiin. Lisäksi selvitettiin metsikkötason ja puutason metsäsuunnittelusimulaattorin toimintaa erilaisilla laskennan lähtöaineistoilla. Inventointitiedon kustannuksiin liittyvän epävarmuuden vuoksi tarkastelussa ei hyödynnetty cost pluss -lähestymistapaa, vaan keskityttiin inventointitiedon tarkkuuden vaikutukseen harvennus- ja avohakkuiden ajoituksessa sekä oletettuihin hakkuutulojen nettonykyarvoihin (NPV). Metsäsuunnittelulaskennat toteutettiin SIMO-simulaattorilla ja Monte Carlo (MC)-simuloinnilla.

SIMO-simuloinnin lähtöaineistona käytettiin Evon tutkimusalueen n. 2000 hehtaarin kuviotietokantaa ja alueella sijainneita 270 puittain mitattua kiinteäsäteistä ympyräkoelaa. Lähtötiedon epävarmuudet otettiin aiemmista tutkimuksista. Yksinpuin-ALS-tulkinnan osalta hyödynnettiin tutkimusta, jossa yhdellä tutkimusalueella (Espoonlahti, Suomi) oli verrattu keskenään yhdentoista kansainvälisen tutkimusryhmän tuottamaa ALS ITD -algoritmin tulosta (Kaartinen & Hyypä 2008).

Tutkimuksen mukaan lähtöaineistolla oli suuri suhteellinen merkitys sekä hakkuiden ajoitukseen että NPV-kertymään. Hakkuiden ajoituksen osalta epätarkasta inventointitiedosta aiheutui lähtötiedosta ja käytetystä simulaattorista riippuen 6,5–10,3 vuoden virhe harvennus- tai päätehakkuun ajoitukseen. Kun ottaa huomioon sen, että hakkuiden keskimääräinen väli on noin 20 vuotta, voidaan sanoa epätarkan inventointitiedon aiheuttavan merkittävän virheen hakkuiden ajoitukseen. Oletettuihin hakkuutulojen nettonykyarvoihin epätarkasta inventointitiedosta aiheutui 28,2–57 %:n suhteellinen virhe. ITD-menetelmän kautta hakkuut pystyttiin ajoittamaan tarkemmin kuin perinteisen kuvioittaisen arvioinnin avulla tuotetulla inventointitiedolla. Oletuksena tällöin oli, että ITD-menetelmän avulla päästään vastaavaan tarkkuuteen, mitä EUROSDR-tutkimuksen (Kaartinen & Hyypä 2008) tarkimmalla algoritmilla. On huomioitava, että algoritmien tuottaman inventointitiedon tarkkuuden hajonta oli EUROSDR-tutkimuksen mukaan suuri. Lisäksi oletettiin puulajitulkinnan onnistuvan täydellisesti, mikä on epärealistista. Viimeaikaisten tutkimusten perusteella puulajitulkinta onnistuu Suomen olosuhteissa (kolme pääpuulajia) ALS-aineistoon ja ilmakuviin perustuvalla yksinpuintulkinnalla 80–90 % tarkkuudella pulssitiheydestä riippuen (Korpela ym. 2010, Vauhkonen ym. 2010). Puutason metsäsuunnittelusimulaattori tuotti hieman tarkemman tuloksen kuin metsikkötason simulaattori. Tutkimuksen johtopäätöksenä kuitenkin oli, että nykyiset simulointimallit eivät pysty täysin hyödyntämään ITD-menetelmän tuottamaa puiden tarkkaa pituustietoa.

ITD-menetelmän yhdeksi keskeiseksi ongelmakohdaksi on mainittu puulajitulkinta (mm. Vauhkonen 2010, Korpela ym. 2010, Vastaranta ym. 2011c). Puulajitulkinnan onnistumisen merkitys metsäsuunnittelun simulointilaskennan näkökulmasta on kuitenkin ollut epäselvää. Tämän vuoksi Holopainen ym. (2008a) tutkivat, kuinka suuri teoreettinen hyöty puulajiositteittain tuotetusta metsän inventointitiedosta voidaan metsäsuunnittelun simulointilaskelmissa saavuttaa verrattaessa sitä metsikkötason keskiarvotietoon. Vertailu perustui harvennus- ja avohakkuiden ajoituksessa syntyviin eroihin 20 vuoden simulointijaksolla. Lisäksi tarkasteltiin puustotunnusten (ikä, pohjapinta-ala, tilavuus, valtapituus, keskipituus, keskiläpimitta) kehittymistä ilman simulointijaksolle osuvia hakkuita. Laskenta tehtiin SIMO-simulointi- ja optimointiohjelmistolla. Simulointiaineistona käytettiin 270 puittain mitattua ympyräkoelaa, jotka perustettiin kesällä 2007 Evon metsäaseman läheisyyteen (sama tutkimusaineisto kuin Holopainen ym. 2010a). Tutkimus osoitti puustosoitiedon olevan tärkeää metsäsuunnittelun simulointilaskelmissa. Näin ollen suunnittelun lähtötietona käytettävä inventointitieto olisi tuotettava puusto-ositteittain.

11.3 Puutavaralajien estimoinnin epävarmuus metsäsuunnittelulaskennassa

Holopainen ym. (2010b) toteuttivat tutkimuksen, jossa tarkasteltiin puutavaralajitasolla samanaikaisesti koko metsäsuunnittelun ALS-inventoinnin ketjua ja siihen liittyviä epävarmuuden lähteitä. Tutkimuksen tavoitteena oli vertailla perinteistä maastoinventointiin perustuvaa kuvioittaista arviointia sekä harvapulssisen laseraineiston ja pienimittakaavaisten ilmakuvien tulkintaan perustuvaa aluetason (ABA) inventointimenetelmää puutavaralajitason tiedon tuottamisessa. Käytetty inventointimenetelmä oli sama, joka on nykyisin operatiivisesti käytössä mm. Suomen Metsäkeskuksessa yksityismetsien metsävaratiedon inventoinnissa. Tutkimuksessa keskityttiin puutavaralajien määrän ja taloudellisen arvon estimointiin

sekä niihin liittyviin epävarmuuden lähteisiin. Inventointivirheen lisäksi tarkasteltiin metsäsuunnittelun simulointilaskentaan liittyvää runkolukusarjan ennustamisen virhettä sekä puun runkomuodon ja apterauksen (katkonnan) ennustamisen virhettä.

Tutkimuksen maastoreferenssinä käytettiin hakkuukoneelta saatuja puutavaralajien kertymätietoja. Tutkimusaineistona oli Evon alueelta talvella 2008 hakatut 31 leimikkoa (5950 puuta), joille saatiin hakkuukoneella mitatut puutavaralajittaiset tilavuudet. Avohakkuuleimikoille (12 kpl, 5400 puuta) tiedettiin tarkasti koko kuvion hakattu puumäärä puutavaralajitasolla. Harvennushakkuuleimikoiden (19 kpl) osalta laskenta perustui leimikoiden sisälle sijoitettuihin ympyräkoeloihin (yht. 90 kpl), jotka mitattiin hakkuuta ennen ja sen jälkeen. Eri virhelähteiden tuottamaa epävarmuutta metsäsuunnittelulaskennassa tutkittiin SIMO-simulointilaskennan (Tokola ym. 2006, Rasinmäki ym. 2009) avulla.

Holopaisen ym. (2010b, Taulukko 3) mukaan suurin epävarmuuden lähde puutavaralajien estimoinnissa metsäsuunnittelulaskennan kautta tapahtuvassa estimoinnissa oli inventointivirhe, joka aiheutti puutavaralajitasolla n. 24–29 %:n epävarmuuden (suhteellisen RMSEn) päätehakkukuvion taloudelliseen arvoon. Maastomittauksiin perustuvalla kuvioittaisella arvioinnilla ja aluepohjaisella ALS-/ilmakuvatulkinta päästiin suurinpiirtein samaan tarkkuuteen. Lisäksi oli havaittavissa merkittävää harhaa etenkin ALS-inventoinnin osalta, joka tosin todennäköisesti johtui tutkimuksessa käytettävissä olleiden leimikoiden pienestä lukumäärästä. Runkolukusarjan muodostaminen ja puun runkomuodon ja apterauksen virhe oli huomattavasti pienempi kuin inventointivirhe, mutta kuitenkin merkittävä. Puutavaralajitasolla virheet olivat suurempia kuin keskitunnusten estimoinnissa (esim. keskitilavuus). Syynä tähän on toisaalta runkolukusarjan muodostamisesta sekä runkomuodon / apterauksen ennustamisesta aiheutuva virhe ja toisaalta puulajitulkinnan epävarmuus.

Taulukko 3. Eri virhelähteiden vaikutus harha%NPV ja rmse%NPV) metsäsuunnittelun simuloinnin avulla estimoituun kuviotason puuston arvoon (€/m³). Maastoreferenssi mitattu hakkuukoneen avulla: 5400 puuta 12 avohakkuukuvioilta. A_ALS = aluepohjainen ALS inventointi, SWFI = kuvioittainen arviointi. Simuloinnissa kulloinkin huomioitu virhelähde on merkitty X:llä (Muokattu, Holopainen ym. 2010b).

Virhelähde				Estimoitu puuston arvo	
A_ALS virhe	kuvioittaisen arvioinnin virhe	Runkolukusarja	Runkomuoto & apteeraus	harha%NPV	rmse%NPV
X				0,6	24,7
	X			-0,1	29,1
		X		-1,2	2,6
	X	X	X	2,5	33,4
X		X	X	4,2	23,8

11.4 Laserkeilausinventointiin, kasvumalleihin ja puun hintakehitykseen liittyvä epävarmuus metsätaloudellisessa tuottoarvolaskennassa

Metsän taloudellinen arvo on keskeinen kiinnostuksen kohde niin metsänomistajan kuin metsä- ja maanmittausorganisaatioiden näkökulmasta. Laserkeilaus avaa mielenkiintoisia mahdollisuuksia metsän arvonmäärittämisessä, sillä uuden inventointimenetelmän avulla on mahdollista saada kustannustehokkaasti entistä tarkempia puusto- ja tuottoarvioita.

Metsäomaisuuden taloudellinen arvo voidaan määrittää esimerkiksi summa-arvomenetelmällä, markkinat huomioivalla tuottoarvomenetelmällä tai metsätaloudellisella tuottoarvomenetelmällä (Holopainen & Viitanen 2009). Kaikissa näissä menetelmissä tarvitaan metsikkötason nettonykyarvolaskentaa (net present value, NPV). Lisäksi käytetään jonkin verran kauppa-arvomenetelmää, jossa metsäomaisuuden arvoa arvioidaan markkinahintojen, eli toteutuneiden metsätilakauppojen perusteella. Taimikoiden osalta hyödynnetään myös kustannusarvomenetelmää.

Metsätaloudellisessa tuottoarvomenetelmässä (Holopainen & Viitanen 2009) metsikön tai metsälön taloudellinen arvo määritetään kaikkien tulevaisuudessa odotettavissa olevien tulojen ja menojen nykyarvojen erotuksena. Menetelmän voidaan katsoa perustuvan Faust-

mannin (1849) maankorkoteoriaan. Useimmiten tulojen ja menojen arviointi perustuu metsäsuunnitelman hakkuu- ja toimenpidesuosituksiin. Tulot ja menot arvioidaan puuntuotosennusteiden perusteella, jotka yleensä määritetään metsäsuunnitteluohjelmiston simulointi- ja optimointilaskelmilla.

Käytännössä metsätaloudellisen tuottoarvon määrittäminen on osa metsäsuunnittelulaskentaa perustuen simuloituihin puu- tai metsikkötason kehitystä kuvaaviin skenaarioihin, joista valitaan optimoimalla metsänomistajan tai metsäsuunnittelijan tavoitteet parhaiten toteuttava vaihtoehto. Metsäsuunnittelun simuloinnit perustuvat suureen joukkoon puiden tai metsiköiden kehitystä kuvaavia malleja (400–600 mallia käytettävästä metsäsuunnitteluo-ohjelmistosta riippuen). Metsää kuvaavat mallit eivät koskaan voi olla täydellisiä olipa niiden laadintamenetelmä mikä tahansa. Ongelman monimutkaisuutta lisää se, että epävarmuustekijät kumuloituvat pitkien malliketjujen ja pitkän tarkasteluajanjakson vuoksi.

Riippumatta metsäomaisuuden arvonmäärittämisessä käytettävästä menetelmästä, laskelmissa käytettävän lähtötiedon epävarmuudella, eli metsävarojen inventointitiedon tarkkuudella on suuri merkitys tuloksen luotettavuuteen. Metsätaloudelliseen tuottoarvomenetelmään perustuvissa laskelmissa inventointitiedon virheiden lisäksi kaksi muuta keskeistä epävar-

muuden lähdeä ovat simulointilaskennassa käytettävien metsien kehitystä kuvaavien mallien tarkkuus sekä raakapuun hintakehityksen ennustaminen.

Holopainen ym. (2010c) vertailivat inventointitiedon, kasvumallien sekä raakapuun hinnanvaihteluihin liittyvää epävarmuutta kiertoajan yli lasketuissa metsätaloudellisissa tuottoarvoissa (NPV). Inventointitiedon epävarmuuden osalta keskityttiin tällä hetkellä olemassa oleviin operatiivisiin menetelmiin, eli verrattiin maastomittauksiin perustuvaa kuvioittaista arviointia ja aluepohjaista ALS-inventointia. Tutkimus toteutettiin SIMO-simuloinneilla, 3 %, 4 % ja 5 %:n korkokannoilla. Tutkimuksen lähtökohtana oli simuloitu 40 kuvion metsälö, jossa oli tasaisesti edustettuna eri puulajit ja kehitysluokat (ns. normaalimetsä, Lönnroth 1930).

Inventointitiedon epävarmuudet laskettiin perustuen kahteen Etelä-Suomessa aiemmin toteutettuun inventointiprojektin aineistoon. Kuvioittaisen arvioinnin virheet perustuivat Haaran ja Korhosen (2004) tutkimukseen ja aluepohjaisen ALS-inventoinnin virheet Packalénin ja Maltamon (2006) tutkimuk-

seen. Kasvumallien tuottaman epävarmuuden huomioimisessa hyödynnettiin kasvumallien virhemalleja. Raakapuun hintakehitystä puolestaan ennustettiin perustuen puutaveralajien hintakehitykseen (1983–2005) sekä stokastiseen, keskiarvohakuisen geometriseen hintamalliin.

Holopainen ym. (2010c, Taulukko 4) mukaan metsäsuunnittelun simulointilaskennassa käytettävät kasvumallit olivat suurin epävarmuuden aiheuttaja kiertoajan yli lasketuissa metsikkötason nettonykyarvoissa. Lähes yhtä suurta epävarmuutta aiheutti lähtötiedon epävarmuus, raakapuun hintavaihteluista johtuvan epävarmuuden ollessa huomattavasti pienempi. Käytetyllä korkokannalla ei juurikaan ollut merkitystä epävarmuuden lähteiden suhteelliseen merkitykseen. Yksittäisillä epävarmuuden lähteillä aiheutui 8–32 % epävarmuutta nettonykyarvoihin, yhteisvaikutuksen ollessa maksimissaan n. 50 %. Mielenkiintosta oli, että yhteisvaikutus on selkeästi pienempi kuin yksittäisten epävarmuuksien lähteiden summa, toisin sanoen epävarmuudet toisinaan myös kumoavat toisiaan. Tutkimuksessa Kehitetty menetelmä mahdollistaa luottamusvälien

Taulukko 4. MC-simulointien avulla tuotettujen NPV-jakaumien harhojen (bias%NPV) ja hajontojen keskiarvot (sd%NPV) eri epävarmuuden lähteillä 3 %:n korkokannalla. U_{PRICE} = Raakapuun hintakehityksestä aiheutuva epävarmuus. U_{FIELD} = Kuvioittaisen arvioinnin virheiden aiheuttama epävarmuus. U_{ALS} = Aluepohjaisen ALS-inventoinnin (A_{ALS}) virheiden aiheuttama epävarmuus. U_{GROWTH} = kasvumalleista aiheutuva epävarmuus. Simuloinnissa kulloinkin huomioidut virhelähteet on merkitty X:llä. (Muokattu, Holopainen ym. 2010c).

Epävarmuuden lähde				Harha 3 % korkokannalla	
U_{PRICE}	U_{FIELD}	U_{ALS}	U_{GROWTH}	bias%NPV	sd%NPV
X				-6,1	8,2
	X			-6,8	28,8
		X		1,7	26,5
			X	-9,5	33,2
X	X			-9,1	29,0
X		X		-1,0	27,4
X			X	-5,7	34,9
	X		X	-12,5	46,9
		X	X	-2,1	46,5
X	X		X	-9,2	47,4
X		X	X	0,1	46,5

muodostamisen tuottoarvolaskelmille. Lisäksi pystytään vertailemaan eri epävarmuuslähteiden merkityksiä sekä saadaan kuva siitä, minkä epävarmuuden vähentämiseen kannattaisi panostaa.

Metsäomaisuuden arvonmäärittelyn yksikkönä on yleensä tila (metsäkiinteistö). Holopainen ym. (2010c) lähtökohtana oli metsikkötason tarkastelu. Näin ollen Holopainen ym. (2010d) laajensivat tarkastelua tilatasolle vertailemalla inventointitiedosta, kasvumalleista sekä puun hinnan vaihtelusta johtuvia epävarmuustekijöitä metsätilan nettonykyarvon laskennassa. Kuten Holopainen ym. (2010c) tutkimuksessa, inventointitiedon epävarmuus saatiin aiemmasta aluepohjaisesta ALS-inventointitutkimuksesta (Packalen ja Maltamo 2006) ja puun hinnan vaihtelua kuvattiin keskiarvoon hakeutuvalla stokastisella hintamallilla. Metsätilojen nettonykyarvo laskettiin kolmella vaihtoehtoisella korkokannalla (3 %, 4 % ja 5 %). Tutkimuksen lähtökohtana oli neljä kuviorakenteeltaan erilaista metsätilyyppiä: 1) taimikkotila, 2) nuoren kasvatusmetsän tila, 3) tasainen kehitysluokkajakauman tila ja 4) hakkuukypsä metsätila. Simuloinnin tuloksena saatiin tuottoarvoennustejakaumat (nettonykyarvoennustejakaumat) kuvioittain ja tiloittain eri korkokannoilla.

Holopainen ym. (2010d) tulosten perusteella tilatasolla aluepohjaiseen ALS-inventointiin liittyvä virhe oli suurin epävarmuuden lähde, johtaen 5,1–7,5 % suhteelliseen NPV:n hajontaan (korkokanta 3 %). Mielenkiintoisena yksityiskohtana oli, että aluepohjainen ALS-inventointi aiheutti merkittävää harhaa tilatason NPV-estimaatteihin. Tutkimuksen tulokset ovat suoraan vertailukelpoisia Holopainen ym. (2010c) tutkimukseen (taulukko 5).

Yhteisvirheiden tarkastelun avulla saatiin epävarmuuksien keskinäisistä suhteista mielenkiintoista tietoa, eli kuinka suuri osuus metsikkötason nettonykyarvon laskennan epävarmuudesta on peräisin mistäkin lähteestä ja minkä epävarmuuden vähentämiseen kannattaisi panostaa. Esimerkiksi Holopainen ym. (2010c) tutkimuksen tulosten perusteella voidaan päätellä, että vaikka inventointitieto olisi täydellistä, tulokseen sisältyy siltikin merkittävää kasvumallien toiminnasta ja puun hintavaihteluista peräisin olevaa virhettä. Toisin sanoen saavutettava tarkkuuden lisäys on rajallinen, vaikka inventoinnin tarkkuuteen panostettaisiin kuinka paljon. Tämä on tärkeä tieto uusien inventointimenetelmiä kehitettäessä ja käyttöön otettaessa. Nykyistä tarkempien kasvumallien kehittäminen olisi tehokkain tapa pienentää nettonykyarvolaskennan epä-

Taulukko 5 (muokattu, Holopainen 2011). Kuviotason (Holopainen ym. 2010c) ja tilatason (Holopainen ym. 2010d) tulosten vertailu. (MC-simulointien kautta tuotettujen NPV-estimaattien harhojen keskiarvot (bias%NPV) ja hajonnat (sd%NPV). Tilataso: 25 ha metsätila, jossa tasainen kehitysluokkajakauma (=normaalimetsä). Laskentakorkokanta 3%. U_{PRICE} = Raakapuun hintakehityksestä aiheutuva epävarmuus. U_{ALS} = Aluepohjaisen ALS-inventoinnin virheiden aiheuttama epävarmuus. U_{GROWTH} = kasvumalleista aiheutuva epävarmuus. Simuloinnissa kulloinkin huomioitu virhelähde (virhelähteet) on merkitty X:llä.

Epävarmuuden lähde			Kuviotaso		Tilataso	
U_{PRICE}	U_{ALS}	U_{GROWTH}	bias%NPV	sd%NPV	bias%NPV	sd%NPV
X			-6,1	8,2	-1,5	3,4
	X		1,7	26,5	12,2	5,1
		X	-9,5	33,2	1,4	1,7
X	X	X	0,1	46,5	13,2	6,5

varmuutta, vaikkakin kasvumallien saaminen metsikkötasolla täydelliseksi on mahdoton tavoite.

Holopaisen (2011) tutkimus loi perusteita kehittää käytännön menetelmiä metsäomaisuuden arvonmäärittelyyn liittyvän epävarmuuden huomioimiseksi. Lisäksi tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa metsävarojen jatkuvan ajantasaistuksen tarkkuutta ja sen sisältämää epävarmuutta. Jatkotutkimusten tavoitteena on metsäomaisuuden arvonmäärittelyyn soveltuvan standardin luominen. Keskeisenä kysymyksenä tuolloin on, kuinka laserkeilauksella tuotettu metsävaratieto sekä kehitetty epävarmuuden huomioiva metsätaloudellinen tuottoarvolaskenta yhdistetään Maanmittauslaitoksen ylläpitämään kauppahintarekisteriin.

12 Tulevaisuus

Suomi laserkeilataan kokonaisuudessaan lähivuosien aikana. Esimerkiksi vuosina 2011–2013 keilattiin metsätalouden soveluksiin n. 3 milj. ha/v ja maanmittauslaitoksen valtakunnallisen korkeusmallihankkeen tarkoituksiin n. 4 milj. ha/v. Viime aikoina on tutkittu (ns. kevtlaser-hanke) mahdollisuuksia laseraineistojen yhteiskäyttöön, eli voitaisiinko maanmittauslaitoksen lehdetörmään aikaan keilattua aineistoa käyttää myös metsäsuunnitteluinventoinneissa. Vuosina 2014–2015 aineistojen yhteiskäyttöä tullaan testaamaan operatiivisesti (MML:n ja Suomen Metsäkeskuksen yhteistyö).

Tekniikan kehittyessä lentolaserkeilausta pystytään tekemään entistä korkeammalta, mikä pienentää aineiston hankintakuluja. Voidaankin nähdä, että laserkeilausaineistosta on tulossa metsäsuunnittelussa vastaava aputietolähde kuin mikä ilmakuvat on jo vuosikymmeniä ollut. Toisin sanoen keilausaineisto tultaneen hankkimaan inventoinnin ja metsäsuunnittelulaskentojen lähtötiedoksi lähes aina. Laserkeilausinventointi on jo nykyisin osa operatiivista metsäsuunnittelua.

Uuden inventointimenetelmän avulla on pystytty saavuttamaan puustotunnusten osalta vähintäänkin maastomittauksiin perustuvan kuvioittaisen arvioinnin tarkkuustaso entistä pienemmin kustannuksin.

Suomen metsäorganisaatioissa ollaan parhaillaan ottamassa käyttöön uusia metsäsuunnittelun tietojärjestelmiä, joiden keskeisenä ideana on metsävaratiedon pitäminen ajantasaisena. Metsäsuunnittelulaskenta perustuu metsävaratietokantaan, joten lähtötiedon tarkkuuden parantuminen uusien laserkeilausmenetelmien kautta on merkittävä edistysaskel. Toisaalta laserkeilausinventointeja on tulevaisuudessa mahdollista hyödyntää myös yhtenä menetelmänä metsävaratietojen ajantasaistuksessa. Jatkossa keskeisellä sijalla tulee olemaan kaiken aikaa tarkentuvan inventointitiedon tuottaman lisäarvon etsiminen.

Jo vuosia, tai oikeastaan vuosikymmeniä, on puhuttu, kuinka metsäteollisuuden varastot siirtyvät yhä enemmän pystypuustoon. Tällöin korostuu metsä- ja leimikkosuunnittelutiedon tarkkuuden merkitys. Ennen hakkuukonemittauksen aikakautta 1970- ja 1980-luvulla suuri osa puukaupasta (n. 50 %) perustui pystymittaukseen. Ajatuksena jo tuolloin oli, että tarkasti ennakkoon mitattua tietoa voidaan hyödyntää puunhankinnan logistiikan ohjauksessa. Pystymittaus oli kuitenkin kallis menetelmä, josta luovuttiin hakkuukonemittauksen yleistyttyä 1980-luvun loppupuolella. ITD-menetelmään perustuva laserkeilaus yhdistettynä TLS- tai MLS-mittauksiin voisi mahdollistaa edullisen tavan palata pystymittauksen aikakauteen. Toistaiseksi haasteena ovat kuitenkin yksittäisten puiden löytyminen, puulajitulkinta sekä runkojen laadun mittaus. Mikäli nämä haasteet pystytään ratkaisemaan tyydyttävällä tavalla, puunhankinnan logistiikkaa ja puiden apteerausta olisi mahdollista tehostaa ja tarkentaa. Lisäksi analysoimalla laserkeilauksella saatua puustotulkintaa ja maastomallia paikkatietojärjestelmissä on mahdollista kehittää monia mielenkiintoisia käytännön metsänhoitoa palvelevia sovelluksia, kuten metsätalouden vesistövaikutusten arviointi, kunnostusojituksen tarpeen selvittäminen tai leimikon korjuukelpoisuuden määrittäminen.

Metsiin sitoutuneen biomassan inventointiin on suurta mielenkiintoa maailmanlaajuisesti niin metsien hiilitaseen kuin bioenergian inventoinnin ja kartoituksen näkökulmista. Laserkeilauksella on useita etuja verrattaessa sitä vaihtoehtoiisiin inventointimenetelmiin. Laserkeilauksen avulla on mahdollista saada tarkkaa tietoa niin puuston pituudesta, runkotilavuudesta kuin latvuston koosta ja rakenteesta. Lentolaserkeilauksen tulosta voidaan tarkentaa maastossa tapahtuvilla lasermittauksilla. Lehtosen ym. (2004) mukaan pohjoisissa havumetsässä 75–85 % puun biomassasta on puun rungossa. Laserkeilaustutkimuksissa on todistettu, että nimenomaan runkotilavuuden estimointitarkkuutta pystytään parantamaan huomattavasti satelliitti- tai ilmakuvaestimaatteihin verrattuna laserkeilauksen tuottaman 3D-tiedon avulla. Runkotilavuus ja puuston biomassassa korreloivat vahvasti puuston pituuden kanssa, joten pelkästään laserkeilaukseen perustuvalla puuston pituusmittauksella pystytään tekemään myös biomassakartoitusta vähintäänkin samalla tarkkuudella kuin esimerkiksi lehtialaindeksiin perustuvilla mittauksilla.

Laserkeilaukseen perustuvalla muutostulokinnalla on useita potentiaalisia tulevaisuuden sovelluksia, etenkin siinä vaiheessa, kun useamman ajankohdan laserkeilausaineistoja on riittävän pitkältä aikaväliltä saatavilla. Kahden tai useamman ajankohdan laserkeilausaineistot tuovat lisämahdollisuuksia operatiiviseen toimintaan, kuten metsikön puuntuotoksen määrittämiseen ja toimenpiteiden ja tuhojen seurantaan. Toisaalta ne avaavat mielenkiintoisia mahdollisuuksia metsien kasvun dynamiikan tutkimukseen.

Tällä hetkellä tutkitaan laserkeilauksen hyödyntämismahdollisuuksia kaiken aikaa laajempien alueiden inventoinneissa. Tarkkuuden lisäksi on selvitettävä eri kaukokartoitusmenetelmien kustannustehokkuus. Laserkeilaus on aputietona kallista verrattuna satelliittikuviin. Ainakin laajojen alueiden monitorintisovelluksissa tarvitaan tulevaisuudessakin lentolaserkeilauksen lisäksi myös

muuta kaukokartoitusaineistoa. Viime vuosina onkin tutkittu esimerkiksi korkean resoluution tutkasatelliittikuvatulkinnan yhdistämistä laserkeilaustulkintaan. Aivan uudelle tasolle globaaleissa sovelluksissa voidaan päästä, mikäli vireillä olevat satelliittilaserkeilausohjelmat toteutuvat.

Uskomme, että metsävarojen inventoinnin ja metsäsuunnittelun tehostaminen on vasta alkua laserkeilauksen mahdollistamalle teknologiaharppaukselle. Lähitulevaisuudessa voidaan nähdä merkittäviä mahdollisuuksia etenkin puunhankinnan logistiikan ja puunkorjuun tehostamisessa sekä metsissä tapahtuvien biomassamuutosten seurannassa. Laserkeilausta hyödynnetään jo nykyisin REDD-ohjelmaan (Reducing Emissions from avoided Deforestation and Degradation) liittyvissä laajojen metsäalueiden inventoinneissa ja seurannassa, Tulevaisuuden trendi lienee laserkeilauksen hyödyntäminen kaiken aikaa suuremmilla alueilla, lopulta tavalla tai toisella jopa globaaleissa sovelluksissa.

Tulevaisuudessa erilaisten laserkeilausmenetelmien yhdistäminen hakkuukonemittauksiin tulee mahdollistamaan ns. täsmämetsätalouden (Holopainen & Hyypä 2009), eli tarkan metsävaratiedon hyödyntämisen kaikilla metsätalouden osa-alueilla. Tämä kehitys tulee mullistamaan operatiivisen metsäsuunnittelun, leimikkosuunnittelun ja valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) nykykäytännöt sekä tuottamaan merkittäviä kustannussäästöjä sekä lisäarvoa puun jalostusketjussa. Tällöin tärkeitä tutkimusaiheita ovat mm. TLS-/MLS-/ALS- ja hakkuukonemittausten yhdistäminen, puiden paikannustarkkuuden parantaminen, tukin laadun mittaaminen sekä uusien sensorien (aaltomuoto-LiDAR, hyperspektri-LiDAR, Vauhkonen ym. 2013b) hyödyntäminen runkolukusarjan ennustamisessa ja puulajitulkinnassa. Operatiivisessa toiminnassa keskeisiä kysymyksiä ovat, mikä entistä tarkemman inventointitiedon arvo on ja kuinka metsävaratiedossa tapahtuvia muutoksia päivitetään mahdollisimman ajantasaisesti.

Lähteet

- Ackermann, F. 1999. Airborne laser scanning – Present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54(2–3): 64–67.
- Ahokas, E., Kaartinen, H., Matikainen, L., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2002. Accuracy of high-pulse-rate laser scanners for digital target models. *Julkaisussa: Observing our environment from space. New solutions for a new millennium, Proceedings of the 21st EARSeL Symposium, May 14–16, 2001, Paris: Balkema, s. 175–178.*
- Ahokas, E., Yu, X., Oksanen, J., Hyypä, J., Kaartinen, H. & Hyypä, H. 2005. Optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning. *Proceedings of ISPRS Workshop Laser scanning, September 12–14, 2005, Enschede, The Netherlands. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI, Part 3/W19: 115–119.*
- Ahokas, E., Kaasalainen, S., Hyypä, J., & Suomalainen, J. 2006. Calibration of the Optech ALTM 3100 laser scanner intensity data using brightness targets. *ISPRS Commission I Symposium, 3–6 July 2006, Marne-la-Vallée, France, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36(A1), CD-ROM.*
- Aldred, A.H. & Bonnor, G.M. 1985. Application of airborne lasers to forest surveys. *Information Report PI-X-51, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, 62 s.*
- Anttila, P. 2002. Updating stand level inventory data applying growth models and visual interpretation of aerial photographs. *Silva Fennica* 36(2): 549–560.
- Axelsson, P. 1999. Processing of laser scanner data—algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54: 138–147.
- Axelsson, P. 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 33, Part B4, 110–117.*
- Axelsson, P. 2001. Ground estimation of laser data using adaptive TIN models. *Julkaisussa: Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. Publication 40: 185–208.*
- Bernard, R., Vidal-Madjar, D., Baudin, F. & Laurent, G. 1987. Nadir looking airborne radar and possible applications to forestry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 21: 297–309.
- Brandtberg, T., Warner, T., Landenberger, R., & McGraw, J. 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85: 290–303.
- Breidenbach, J., Næsset, E., Lien, V., Gobakken, T., Solberg, S. 2010. Prediction of species specific forest inventory attributes using a nonparametric semi-individual tree crown approach based on fused airborne laser scanning and multispectral data. *Remote Sensing of Environment* 114: 911–924.
- Breiman, L. 2001. Random forests. *Mach. Learn.* 2001(45): 5–32.
- Chasmer, L., Hopkinson, C., & Treitz, P. 2006. Investigating laser pulse penetration through a conifer canopy by integrating airborne and terrestrial lidar. *Canadian Journal of Remote Sensing* 32(2): 116–125.
- Côté, J.F., Widlowski, J.L., Fournier, R.A. & Verstraete, M.M. 2009. The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar. *Remote Sensing of Environment* 113: 1067–1081.
- Currie, D., Shaw, V., & Bercha, F. 1989. Integration of laser rangefinder and multispectral video data for forest measurements. *Julkaisussa: Proceedings of IGARSS'89 Conference, July 4, 10–14, Vancouver, Canada, s. 2382–2384.*

- Dralle, K. & Rudemo, M. 1996. Stem number estimation by kernel smoothing of aerial photos. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1228–1236.
- Elachi, C. 1987. Spaceborne radar remote sensing: Applications and techniques. IEEE Press. New York, 255p.
- Elmqvist, M., Jungert, E., Lantz, F., Persson, Å. & Söderman, U. 2001. Terrain modelling and analysis using laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, 3/W4, 219–226.
- Eid, T., Gobakken, T. & Næsset, E. 2004. Comparing stand inventories for large areas based on photo-interpretation and laser scanning by means of cost-plus-loss analyses. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 512–523.
- Falkowski, M.J., Smith, A.M.S., Hudak, A.T., Gessler, P.E., Vierling, L.A., & Crookston, N.L. 2006. Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(2): 153–161.
- Faustmann, M. 1849. Berechnung des Wertes welchen Waldboden, sowie noch nicht haubare Hozbestände für die Waldwirtschaft besitzen. *Allgemeine Forst- und Jagd-Zeitung* 25: 441–455. (Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. Julkaisussa: Gane, M (toim.). 1968. Martin Faustmann and the evolution of discounted cash flow. *Commonwealth Forestry Institute Paper No. 42*, University of Oxford. s. 19–26 / Gane, M. 1995. Calculation of the value which forest land and immature stands possess for forestry. *Journal of Forest Economics* 1(1): 7–44.
- Fowler, R., Samberg, A., Flood, M., & Greaves, T. 2006. Topographic and terrestrial lidar, Julkaisussa: Maune, D. (toim.), *Digital Elevation Model Technologies & Applications*. 2nd Ed, ASPRS. Chapter 7: 199–252.
- Franco-Lopez, H., Ek, A.R. & Bauer, M.E. 2001. Estimation and mapping of forest density, volume and cover type using the k-nearest neighbors method. *Remote Sensing of Environment* 77: 251–274.
- Friedlaender, H. & Koch, B. 2000. First experience in the application of laserscanner data for the assessment of vertical and horizontal forest structures. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33(B7).
- Gaveau, D. & Hill, R. 2003. Quantifying canopy height underestimation by laser pulse penetration in small-footprint airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 650–657.
- Gedcke, D. & McDonald, W.J. 1968. Design of the constant fraction of pulse height trigger for optimum time resolution. *Nuclear Instruments and Methods* 58: 253–260.
- Gregoire, T., Ståhl, G., Næsset, E., Gobakken, T., Nelson, R. & Holm, S. 2011. Model-assisted estimation of biomass in a LiDAR sample survey in Hedmark county, Norway. *Canadian Journal of Remote Sensing* 41: 83–95.
- Gobakken, T. & Næsset, E. 2004. Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 529–542.
- Goldberg, D.E. 1989. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison Wesley Publishing Company, Reading, Massachusetts, 412 p.
- Goodwin, N.R., Coops, N.C., & Culvenor, D.S. 2006. Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. *Remote Sensing of Environment* 103(2): 140–152.
- Haala, N., Hastedt, H., Wolf, K., Ressler, C. & Baltrusch, S. 2010. Digital Photogrammetric Camera Evaluation – Generation of Digital Elevation Models. *The Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Processing (PFG)* 02/2010: 98–115
- Haara, A. & Korhonen, K. 2004. Kuvioittaisen arvioinnin luotettavuus. *Metsätieteen*

- aikakauskirja 4/2004: 489–508.
- Harding, D.J., Lefsky, M.A., Parke, G.G., & Blair, J.B. 2001. Laser altimeter canopy height profiles. Methods and validation for closed canopy, broadleaf forests. *Remote Sensing of Environment* 76(3): 283–297.
- Heinzel, J., H. Weinacker & Koch. B. 2011. Prior knowledge based single tree extraction. *International Journal of Remote Sensing* 32: 4999–5020.
- Henning, J.G. & Radtke, P. J., 2006. Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning lidar. *Forest Science* 52(1): 67–80.
- Hofton, M.A., Rocchio, L., Blair, J.B., & Dubayah. R. 2002. Validation of vegetation canopy Lidar sub-canopy topography measurements for a dense tropical forest. *Journal of Geodynamics* 34(3–4): 491–502.
- Holmgren, J. 2003, Estimation of forest variables using airborne laser scanning. PhD Thesis, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Silvestria 278, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden.
- Holmgren, J. & Persson, Å. 2004, Identifying species of individual trees using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 415–423.
- Holmgren, J., Persson, Å., Söderman, U. 2008. Species identification of individual trees by combining high resolution LiDAR data with multi-spectral images. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1537–1552.
- Holmgren J, Barth A, Larsson H, Olsson H. 2012. Prediction of stem attributes by combining airborne laser scanning and measurements from harvesters. *Silva Fennica* 46: 227–239.
- Holopainen, M. 1998. Forest habitat mapping by means of digitized aerial photographs and multispectral airborne measurements. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, Publications 18. Doctoral thesis.
- Holopainen, M. 2011. Effect of airborne laser scanning accuracy on forest stock and yield estimates. Aalto University, School of Engineering, Department of Surveying. Aalto University Doctoral Dissertations 6/2011.
- Holopainen, M. & Lukkarinen, E. 1994. Digitaalisten ilmakuvien käyttö metsävarojen inventoinnissa. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, publications 4.
- Holopainen, M. & Hyypä, J. 2003. Possibilities with laser scanning in practical forestry. Julkaisussa: Hyypä, J. Naesset, E, Olsson, H., Granqvist Pahlen, T., & Reese, H. (toim.), Proceedings of the Scandlaser Scientific Workshop on Airborne Laser Scanning of Forests, s. 264–273.
- Holopainen, M. & Talvitie, T. 2006. Effect of data acquisition accuracy on timing of stand harvests and expected net present value. *Silva Fennica* 40(3): 531–543.
- Holopainen, M., Haapanen, R., Tuominen S. & Viitala, R. 2008a. Performance of airborne laser scanning- and aerial photograph-based statistical and textural features in forest variable estimation. Proceedings of SilviLaser 2008: 8th international conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory, Heriot-Watt University, Edinburgh, UK, September 17–19, 2008. s. 105–112.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Hyypä, J., Hyypä, H. & Rönnholm, P. 2008b. Utilization of tree species stratum data in forest planning simulations. Julkaisussa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. (toim.) Silvilaser 2008 proceedings: 458–466.
- Holopainen, M. & Hyypä, J. 2009. Kohden lasermittauksiin perustuvaa täsmämetsätaloutta. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2009: 357–360.
- Holopainen, M. & Viitanen, K. 2009. Käsitteistä ja epävarmuudesta metsäkiinteistöjen taloudellisen arvon määrittämisessä. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2009: 135–140.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyypä, J., Hyypä, H., Kaartinen, H., Viitala R., Vastaranta, M., Kangas, A. 2010a. Effect of tree level airborne

- laser scanning accuracy on the timing and expected value of harvest decisions. *European Journal of Forest Research* 129: 899–910.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Rasinmäki, J., Kalliovirta, J., Mäkinen, A., Haapanen, R. Melkas, T., Yu, X. & Hyypä, J. 2010b. Uncertainty in timber assortment estimates predicted from forest inventory data. *European Journal of Forest Research* 129: 1131–1142
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyttiäinen, K., Bayazidi, S. & Pietilä, I. 2010c. Comparison of various sources of uncertainty in stand-level net present value estimates. *Forest Policy and Economics* 12(2010): 377–386, DOI 10.1016/j.forpol.2010.02.009.
- Holopainen, M., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Hyttiäinen, K., Bayazidi, S. Vastaranta, M. & Pietilä, I. 2010d. Uncertainty in forest net present value estimations. *Forests* 2010(1): 177–193, DOI 10.3390/f1030177.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Haapanen, R., Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Viitala, R. & Hyypä, H. 2010e. Site-type estimation using airborne laser scanning and stand register data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(1): 16–32.
- Holopainen, M., Haapanen, R., Karjalainen, M., Vastaranta, M., Hyypä, J. Yu, X., Tuominen, S., Hyypä, H., 2010f. Comparing accuracy of airborne laser scanning and TerraSAR-X radar images in the estimation of plot-level forest variables. *Remote Sensing*, Vol. 2, s. 432–445. Doi: 10.3390/rs2020432.
- Holopainen, M., Hyypä, J., Vaario, L-M. & Yrjälä, K. 2010g. Implications of Technological Development to Forestry. Invited book chapter. Julkaisussa: Mery, G., Katila P, Galloway, G., Alfaro, R.I., Kanninen, M., Lobovikov, M., Varjo, J. (toim.) *Forest and Society – Responding to Global Drivers of Change*. IUFRO-World Series Volume 25. s. 157–182 (Convening lead authors of the chapter: Hetemäki, L. & Mery, G.).
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Kankare, M., Rätty, M, Vaaja, M., Liang, X., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Kaasalainen, S. & Viitala, R. 2011a. Biomass estimation of individual trees using stem and crown diameter measurements. Julkaisussa: Lichti, D. & Habib, A. 2011. *LaserScanning 2011 proceedings*.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Kankare, V., Hyypä, J., Liang, X., Litkey, P., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, A., Kaasalainen, S., Hyypä, H. Vaaja, M. & Jaakkola, A. 2011b. The use of ALS, TLS and VLS measurements in mapping and monitoring urban trees. Julkaisussa: Stilla, U., Gamba, P., Juergens, C., Maktav, D. (Toim) *JURSE 2011 – Joint Urban Remote Sensing Event – Munich, Germany, April 11–13, 2011*.
- Holopainen, M., Vastaranta, M., Liang, X., Hyypä, J., Jaakkola, A. & Kankare, V. 2013a. Estimation of forest stock and yield using Lidar data. Julkaisussa: Wang, G. & Weng, Q. *Remote Sensing of Natural Resources*. Taylor and Francis, painossa.
- Holopainen, M, Kankare, V., Vastaranta, M., Liang, X., Lin, Y., Vaaja, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Tanhuanpää, T. & Alho, P. 2013b. Tree mapping using airborne, terrestrial and mobile laser scanning – a case study in a heterogeneous urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening* (2013), doi: 10.1016/j.ufug.2013.06.002, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866713000617>
- Hopkinson, C., Chasmer, L., Young-Pow, C. & Treitz, P. 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 573–583.
- Hopkinson, C., Chasmer, L. & Hall, R.J. 2008. The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal lidar datasets. *Remote Sensing of Environment* 112: 1168–1180.
- Hosoi, F. & Omasa, K. 2006. Voxel-based 3-D modeling of individual trees for estimating leaf area density using high-resolution

- portable scanning lidar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44: 3610–3618.
- Huang, H., Li, Z., Gong, P., Cheng, X., Clinton, N., Cao, C., Ni, W. & Wang, L. 2011. Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 77: 219–227.
- Hudak, A.N., Crookston, J., Evans, D., Hall & Falkowski, M. 2008. Nearest neighbor imputation of species-level, plot-scale forest structure attributes from LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* 112: 2232–2245.
- Hyde, P., Nelson, R., Kimes, D., & Levine, E. 2007. Exploring LiDAR-RaDAR Synergy - Predicting Aboveground Biomass in a Southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR, and InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 106(1): 28–38.
- Hyvönen, P. 2007. The updating of forest resource data for management planning for privately owned forests in Finland. *Dissertationes Forestales* 38. 40 p.
- Hyypä H. & Hyypä, J. 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensing data sources for stand attribute retrieval. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16(2): 5–15.
- Hyypä, J. 1993. Development and feasibility of airborne ranging radar for forest assessment. PhD Thesis, Helsinki University of Technology, Laboratory of Space Technology, 112 s.
- Hyypä, J. & Hallikainen, M. 1993. A helicopter-borne eight-channel ranging scatterometer for remote sensing. Part II: Forest inventory, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 31(1): 170–179.
- Hyypä, J. & Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland* 16: 27–42.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Inkinen, M., Engdahl, M., Linko, S., & Zhu, Y.-H. 2000. Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management* 128(1): 109–120.
- Hyypä, J., Kelle, O., Lehtikainen, M. & Inkinen M. 2001a. A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(5): 969–975.
- Hyypä, J., Schardt, M., Haggrén, H., Koch, B., Lohr, U., Scherrer, H.U., Paananen, R., Luukkonen, H., Ziegler, M., Hyypä, H., Pyysalo, U., Friedländer, H., Uutera, J., Wagner, S., Inkinen, M., Wimmer, A., Kukko, A., Ahokas, E., & Karjalainen, M. 2001b. HIGH-SCAN: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 17: 58–68.
- Hyypä, H., Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Honkavaara, E. & Rönholm, P. 2005. Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *Julkaisussa: Proceedings of ISPRS Workshop Laser scanning 2005, September 12–14, 2005, Enschede, Netherlands, XXXVI(Part 3/ W19), s. 85–90.*
- Hyypä, J., Yu, X., Hyypä, H. & Maltamo, M. 2006. Methods of airborne laser scanning for forest information extraction. *EARSeL SIG Forestry. Julkaisussa: International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry Proceedings, Vienna, February 14–15, 2006, s. 63–78.*
- Hyypä, J., Jaakkola, A., Hyypä, H., Kaartinen, H., Kukko, A., Holopainen, M., Zhu, L., Vastaranta, M., Kaasalainen, S., Krooks, A., Litkey, P., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Matikainen, L., Rönholm, P., Chen, R., Chen, Y., Kivilahti, A. & Kosonen, I. 2009a. Map Updating and Change Detection Using Vehicle-Based Laser Scanning. 2009 Urban Remote Sensing Joint Event, 20.–22. May, Shanghai.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Yu, X., Kaartinen, H., Kukko, H. & Holopainen, M., 2009b.

- Forest inventory using small-footprint airborne lidar, Invited Book Chapter to Shan, J. & Toth, C. (toim.). *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. s. 335–370.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. & Maltamo, M. 2008, Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29(5): 1339–1366.
- Hyypä, J., Yu, X., Hyypä, H., Vastaranta, M., Holopainen, M., Kukko, A., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Vaaja, M., Koskinen, J. & Alho, P. 2012. Advances in Forest Inventory Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing* 2012(4): 1190–1207; doi: 10.3390/rs4051190.
- Junttila, Maltamo, M., Kauranne, T. 2008. Sparse Bayesian estimation of forest stand characteristics from airborne laser scanning. *Forest Science* 56(3) 2010: 257–270.
- Järnstedt, J., Pekkarinen, A., Tuominen, S., Ginzler, C., Holopainen, M. & Viitala, R. 2012. Forest variable estimation using a high-resolution digital surface model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 74(2012): 78–84.
- Kaartinen H. & Hyypä J. 2008. EuroSDR/ISPRS Project, Commission II "Tree Extraction", Final Report, EuroSDR. European Spatial Data Research, Official Publication No 53.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschogl, M., Morsdorf, F., Naesset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Bernd, M. & Wu, J. 2012. An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing* 4(4): 950–974.
- Kaasalainen, S., Hyypä, H., Kukko, A., Litkey, P., Ahokas, A., Hyypä, J., Lehner, H., Jaakkola, A., Suomalainen, J., Akujärvi, A., Kaasalainen, M. & Pyysalo, U. 2009. Radiometric Calibration of LIDAR Intensity With Commercially Available Reference Targets. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(2): 588–598
- Kaasalainen, S., Hyypä, J., Krooks, A., Karjalainen, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., A. Jaakkola. 2010. Comparison of terrestrial laser scanner and Synthetic aperture radar data in the study of forest defoliation. *ISPRS Commission VII Symposium*, July 5–7, 2010, Vienna, Austria.
- Kalliovirta, J., Tokola, T., 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39(2): 227–248.
- Kankare, V., Holopainen, M., Vastaranta, M., Puttonen, E., Yu, X., Hyypä, J., Vaaja, M., Hyypä, H. & Alho, P. 2013a. Individual tree biomass estimation using terrestrial laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75(2013): 64–75.
- Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Rätty, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Alho, P. & Viitala, R. 2013b. Retrieval of forest above-ground biomass and volume with airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 2013(5): 2257–2274, doi: 10.3390/rs5052257.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Yu, X., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Talvitie, M., Kaasalainen, S., Solberg, S., Hyypä, J. 2010. Classification of defoliated trees using tree-level airborne laser scanning data combined with aerial images. *Remote Sensing* (2): 2665–2679.
- Kantola, T., Vastaranta, M., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Talvitie, M. & Hyypä, J. Classification of Needle Loss of Individual Scots Pine Trees by Means of Airborne Laser Scanning. *Forests* 2013 4(2): 386–403. doi: 10.3390/f4020386
- Karjalainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M. & Hyypä, J. 2012. Prediction of plot-level forest variables

- using TerraSAR-X stereo SAR data. *Remote Sensing of Environment* 117: 338–347.
- Kellndorfer, J. M., Walker, W. S., LaPoint, E., Kirsch, K., Bishop, J. & Fiske, G. 2010. Statistical fusion of lidar, InSAR, and optical remote sensing data for forest stand height characterization: A regional-scale method based on LVIS, SRTM, Landsat ETM+, and ancillary data sets. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 115, G00E08. Doi: 10.1029/2009JG000997.
- Kilkki, P. & Päävinen, R. 1987. Reference sample plots to combine field measurements and satellite data in forest inventory. Department of Forest Mensuration and Management, University of Helsinki. Research notes 19: 210–215.
- Korpela, I. 2004. Individual tree measurements by means of digital aerial photogrammetry. *Silva Fennica. Monographs* 3. 93 p. Doctoral thesis.
- Korpela, I. & Tokola, T. 2006. Potential of aerial image-based monoscopic and multiview single-tree forest inventory: A simulation approach. *Forest Science* 52: 136–147.
- Korpela, I., Koskinen, M., Vasander, H., Holopainen, M., Minkinen, K., 2009. Airborne small-footprint discrete-return LIDAR data in the assessment of boreal mire surface patterns, vegetation and habitats. *Forest Ecology and Management* 258: 1549–1566.
- Korpela, I., Ørka, H. O., Maltamo, M., Tokola, T. & Hyypä, J., 2010. Tree species classification using airborne LiDAR – effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization and sensor type. *Silva Fennica* 44: 319–339.
- Korhonen, L. 2011. Estimation of boreal forest canopy cover with ground measurements, statistical models and remote sensing. *Dissertationes Forestales* 115. University of Eastern Finland, School of Forest Sciences.
- Korhonen, L., Peuhkurinen, J., Malinen, J., Savanto, A., Maltamo, M. Packalen, P. & Kangas, J. 2008. The use of airborne laser scanning to estimate sawlog volumes. *Forestry* 81(4): 499–510.
- Korhonen, L., Korpela, I., Heiskanen, J., & Maltamo, M. 2011. Airborne discrete-return LIDAR data in the estimation of vertical canopy cover, angular canopy closure and leaf area index. *Remote Sensing of Environment* 115(4): 1065–1080.
- Kraus, K., & Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal Photogrammetry & Remote Sensing* 53: 193–203.
- Laasasenaho, J. & Päävinen, R. 1986. Kuvioittaisen arvioinnin tarkistamisesta. *Folia Forestalia* 664.
- Le Toan, T., Beaudoin, A., Riou, J. & Guyon, D., 1992. Relating Forest Biomass to SAR Data. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing* 30(2): 403–411.
- Leckie, D., Gougeon, F., Hill, D., Quinn, R., Armstrong, L., & Shreenan, R. 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5): 633–649.
- Lefsky, M., Cohen, W., Parker, G., & Harding, D. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience* 52: 19–30.
- Lefsky, M. & McHale, M.R. 2008. Volume estimates of trees with complex architecture from terrestrial laser scanning. *Journal of Applied Remote Sensing*. doi: 10.1117/1.2939008
- Lindberg, E. 2012. Estimation of canopy structure and individual trees from laser scanning data. *Acta Universitatis agriculturae Sueciae*, 1652–6880: 2012:33, SLU, Doctoral thesis.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Kukko, A. & Holopainen, M. 2011. Automatic plot-wise tree location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(2): 37–48.

- Liang, X., Litkey, P., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2012a. Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50(2): 661–670.
- Liang, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Holopainen, M. & Melkas, T. 2012b. Detecting changes in forest structure over time with bi-temporal terrestrial laser scanning data. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 1(3): 242–255.
- Liang, X., Kankare, V., Yu, X., Hyyppä, J. & Holopainen, M. 2013. Automated stem curve measurement using terrestrial laser scanning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, DOI 10.1109/TGRS.2013.2253783.
- Lin, Y. & Hyyppä, J. 2010. Leaf area index (LAI) estimation based on vehicle-based laser scanning. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, s. 3422–3425, Jun 25–30, Honolulu, HI.
- Lin, Y., Jaakkola, A., Hyyppä, J. & Kaartinen, H. 2010. From TLS to VLS: Biomass Estimation at Individual Tree Level. *Remote Sensing* 2: 1864–1879.
- Lin, Y., Hyyppä, J., Jaakkola, A. & Holopainen, M. 2012. Characterization of mobile LiDAR data collected with multiple echoes per pulse from crowns during foliation. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27(3): 298–311.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Culvenor, D.S. & Coops, N.C. 2003. Using airborne and ground-based ranging lidar to measure canopy structure in Australian forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 607–622.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Newnham, G.J. & Culvenor, D.S. 2011. Measuring tree stem diameters using intensity profiles from ground-based scanning lidar from a fixed viewpoint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 46–55.
- Lönnroth, E. 1930. Normaalimetsä. Teoksessa: Ilvessalo, L. & Ilvessalo, Y. (toim.). Maa ja metsä IV. Metsätalous III. WSOY, Porvoo. s. 753–763.
- Maas, H.-G., Bienert, A., Scheller, S. & Keane, E. 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1579–1593.
- Maclean, G. & Krabill, W. 1986. Gross-merchantable timber volume estimation using an airborne lidar system. *Canadian Journal of Remote Sensing* 12: 7–18.
- Magnussen, S. & Boudewyn, P. 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data with canopy-based quantile estimators. *Canadian Journal of Forest Research* 28: 1016–1031.
- Maltamo, M., Mustonen, K., Hyyppä, J., Pitkänen, J., & Yu, X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 1791–1801.
- Maltamo, M., Malinen, J., Packalén, P., Suvanto, A. & Kangas, J. 2006. Non-parametric estimation of stem volume using laser scanning, aerial photography and stand register data. *Canadian Journal of Forest Research* 36: 426–436.
- Maltamo, M., Peuhkurinen, J., Malinen, J., Vauhkonen, J., Packalén, P. & Tokola, T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica* 43(3): 507–521.
- Maltamo, M., Bollandssås, OM, Vauhkonen J, Breidenbach J, Gobakken T & Næsset E. 2010. Comparing different methods for prediction of mean crown height in Norway spruce stands using airborne laser scanner data. *Forestry* 83: 257–268.
- Maltamo, M., Bollandssås, OM., Naeset, E., Gobakken, T. & Packalén, P. 2011. Different plot selection strategies for field training data in ALS-assisted forest inventory. *Forestry* 84(1): 23–31.
- Markelin, L., Honkavaara, E., Beisl, U. & Korpela, I. 2010. Validation of the radiometric processing chain of the Leica

- ADS40 airborne photogrammetric sensor. Julkaisussa: Wagner, W., Székely, B. (toim.): ISPRS TC VII Symposium – 100 Years ISPRS, Vienna, Austria, July 5–7, 2010, IAPRS, Vol. XXXVIII, Part 7A.
- Mehtätalo, L. & Nyblom, J. 2009. Estimating forest attributes using observations of canopy height: a model-based approach. *Forest science* 55(5): 411–422.
- Melkas, T., Vastaranta, M., Haapanen, R., Holopainen, M., Yu, X., Hyyppä, J. & Hyyppä, H. 2009. Updating forest resource data by using ALS measurements and information collected with a harvester. Julkaisussa: Popescu, S., Nelson, R., Zhao, K. & Neuenschwander, A. (toim.). *Silvilaser 2009 proceedings*, s. 128–136.
- Morsdorf, F., Meier, E., Allgöwer, B., & Nüesch, D. 2003. Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34 (3/W13): 27–33.
- Mäkinen, A. Holopainen, M., Kangas, A. & Rasinmäki, J. 2010. Propagating the errors of initial forest variables through stand- and tree-level growth simulators. *European Journal of Forest Research* 129: 887–897, DOI 10.1007/s10342-009-0288-0.
- Mäkinen, A., Kangas, A. & Nurmi, M. 2012. Using Cost-Plus-Loss Analysis to Define Optimal Forest Inventory Interval and Forest Inventory Accuracy. *Silva Fennica* 46(2): 211–226.
- Næsset, E., 1997a. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 52: 49–56.
- Næsset, E., 1997b. Estimating timber volume of forest stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61(2): 246–253.
- Næsset, E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment* 80: 88–99.
- Næsset, E. 2004. Practical Large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 164–179.
- Næsset, E., & Økland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79: 105–115.
- Næsset, E., Gobakken, T. 2005. Estimating forest growth using canopy metrics derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 96: 453–465.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyyppä, H., Hyyppä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å. & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19(6): 482–499.
- Nelson, R., Krabill, W. & Maclean, G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201–212.
- Nelson, R., Krabill, W., & Tonelli, J. 1988. Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 24: 247–267.
- Nelson, R., Parker, G. & Hom, M. 2003a. A portable airborne laser system for forest inventory. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69: 267–273.
- Nelson, R., Valenti, M.A., Short, A. & Keller, C. 2003b. A multiple resource inventory of Delaware using airborne laser data. *BioScience* 53: 981–992.
- Nelson, R., Short, A. & Valenti, M. 2004. Measuring biomass and carbon in Delaware using an airborne profiling LIDAR. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 500–511.
- Nelson, R.F., Hyde, P., Johnson, P., Emessiene, B., Imhoff, M.L., Campbell, R. & Edwards, W. 2007. Investigating RaDAR-LiDAR synergy in a North Carolina pine forest. *Remote Sensing of Environment* 110(1): 98–108.

- Nilsson, M. 1990. Forest inventory using an airborne LIDAR system. Julkaisussa: Proceedings from SNS/IUFRO Workshop in Umeå, Remote Sensing Laboratory, Report 4, February, 26–28, 1990, (Umeå: Swedish University of Agricultural Sciences), s. 133–139.
- Nilsson, M. 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56: 1–7.
- Niska, H., Skön, J.-P., Packalén, P., Tokola, T., Maltamo, M. & Kolehmainen, M. 2010. Neural Networks for the Prediction of Species-Specific Plot Volumes Using Airborne Laser Scanning and Aerial Photographs *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48: 1076–1085.
- Närhi, M., Maltamo, M., Packalén, P., Peltola, H. & Soimasuo, J. 2008. Kuusen taimikoiden inventointi ja taimikonhoidon kiireellisuuden määrittäminen laserkeilauksen ja metsäsuunnitelmätietojen avulla. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2008: 5–15.
- Packalén, P. 2009. Using airborne laser scanning data and digital aerial photographs to estimate growing stock by tree species. *Dissertationes Forestales* 77. Doctoral thesis.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2006. Predicting the plot volume by tree species using airborne laser scanning and aerial photographs. *Forest Science* 56: 611–622.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2007. The k-MSN method in the prediction of species specific stand attributes using airborne laser scanning and aerial photographs. *Remote Sensing of Environment* 109: 328–341.
- Packalén, P. & Maltamo, M. 2008. Estimation of species-specific diameter distributions using airborne laser scanning and aerial photographs. *Canadian Journal of Forest Research* 38: 1750–1760.
- Pekkarinen, A. 2004. Image segmentation in multi-source forest inventory. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* - The Finnish Forest Research Institute, Research Papers 926. 35 p.
- Persson, Å., Holmgren, J., Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68: 925–932.
- Pesonen, A. 2011. Comparison of field inventory methods and use of airborne laser scanning for assessing coarse woody debris. *Dissertationes Forestales* 113. University of Eastern Finland, School of Forest Sciences.
- Pesonen, A., Maltamo, M., Eerikäinen, K. & Packalén, P. 2008. Airborne laser scanning-based prediction of coarse woody debris volumes in a conservation area. *Forest Ecology and Management* 255: 3288–3296.
- Peuhkurinen, J., Maltamo, M., Malinen, J., Pitkänen, J. & Packalén, P., 2007. Preharvest measurement of marked stands using airborne laser scanning. *Forest Science* 53(6): 653–661.
- Peuhkurinen, J., Maltamo M. & Malinen, J. 2008. Estimating species-specific diameter, distributions and saw log recoveries of boreal forests from airborne laser scanning data and aerial photographs: a distribution-based approach. *Silva Fennica*, 42: 625–641.
- Pfeifer, N., Winterhalder, D., 2004. Modelling of tree cross sections from terrestrial laser-scanning data with free-form curves. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36(8/W2): 76–81.
- Pitkänen, J. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31(5): 832–844.
- Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyyppä, J. & Yu, X. 2004. Adaptive methods for individual tree detection on airborne laser based canopy height model. Julkaisussa: Theis, M.; Koch, B.; Spiecker, H.; Weinacker, H. (toim.). *Proceedings of ISPRS working*

- group VIII/2: Laser-scanners for Forest and Landscape Assessment". University of Freiburg, Germany, 2004, s. 187–191.
- Poso, S., 1983. Kuvioittaisen arvioimismenetelmän perusteita. *Silva Fennica* 17: 313–343.
- Poso, S., Häme, T., Paananen, R., 1984. A method of estimating the stand characteristics of a forest compartment using satellite imagery. *Silva Fennica* 18: 261–292.
- Poso, S., Wang, G. & Tuominen, S. 1999. Weighting alternative estimates when using multi-source auxiliary data for forest inventory. *Silva Fennica* 33: 41–50.
- Pyysalo, U. 2000. Generation of elevation models in wooded areas from a three dimensional point cloud measured by laser scanning. MSc Thesis, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, 68 s.
- Rasinmäki, J., Kalliovirta, J. & Mäkinen, A. 2009. An adaptable simulation framework for multiscale forest resource data. *Computers and Electronics in Agriculture* 66: 76–84.
- Rauste, Y. 1990. Incidence-angle dependence in forested and non-forested areas in Seasat SAR data. *International Journal of Remote Sensing* 11: 1267–1276.
- Rauste, Y., Häme, T., Pulliainen, J., Heiska, K. & Hallikainen, M. 1994. Radar-based forest biomass estimation. *International Journal of Remote Sensing* 15: 2797–2808.
- Reutebuch, S., McGaughey, R., Andersen, H. & Carson, W. 2003. Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 527–535.
- Räty, M., Kankare, V., Yu, X., Holopainen, M., Vastaranta, M., Kantola, T., Hyypä, J. & Viitala, R. 2011. Tree biomass estimation using ALS features. *Silvilaser Proceedings* 2011.
- Rönholm, P., Hyypä, J., Hyypä, H., Haggrén, H., Yu, X., Kaartinen, H. 2004. Calibration of laser-derived tree height estimates by means of photogrammetric techniques. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 524–528.
- Saari, A. & Kangas, A. 2005. Kuvioittaisen arvioinnin harhan muodostuminen. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2005: 5–18.
- Schreier, H., Loughheed, J., Tucker, C. & Leckie, D., 1985. Automated measurements of terrain reflection and height variations using airborne infrared laser system. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 101–113.
- Sithole, G. 2001. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 34(3/W4): 203–210.
- Sithole, G. & Vosselman, G. 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 59: 85–101.
- Solberg, S. 2008. Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables. *International Journal of Remote Sensing* 31(5): 1227–1244.
- Solberg, S., Næsset, E., Hanssen, K.H., Christiansen, E., 2006. Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 102: 364–376.
- Solberg, S., Brunner, A., Hanssen, K.H., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M. & Stenberg, P. 2009. Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 113: 2317–2327.
- Solberg, S., Astrup, R., Bollandsås, O. M., Næsset, E., & Weydahl, D. J. 2010. Deriving forest monitoring variables from X-band InSAR SRTM height. *Canadian Journal of Remote Sensing* 36(1): 68–79.
- Solodukhin, V., Zukov, A., & Mazugin, I. 1977. Possibilities of laser aerial photography for forest profiling, Lesnoe Khozyaisto (Forest Management) 10: 53–58. (venäjänkielinen).
- Strahler, A.H., Jupp, D.L.B., Woodcock, C.E., Schaaf, C.B., Yao, T., Zhao, F., Yang, X., Lovell, J., Culvenor, D. & Newnham, G. 2008. Retrieval of forest structural

- parameters using a ground-based lidar instrument (Echidna®). *Canadian Journal of Remote Sensing* 34: 426–440.
- St-Onge, B., Jumelet, J., Cobelli, M., & Véga, C. 2004. Measuring individual tree height using a combination of stereophotogrammetry and lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(10): 2122–2130.
- St-Onge, B. & Vepakomma, U. 2004. Assessing forest gap dynamics and growth using multitemporal laser scanner data. *International Conference NATSCAN 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications'*, October 3–6, 2004, Freiburg, Germany. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI(8/W2): 173–178.
- St-Onge, B., Vega, C., Fournier, R.A. & Hu, Y. 2008. Mapping canopy height using a combination of digital stereo-photogrammetry and lidar. *International Journal of Remote Sensing* 29: 11: 3343–3364.
- Ståhl, G., Holm, S., Gregoire, T., Gobakken, T., Næsset, E. & Nelson, R. 2011. Model-based inference for biomass estimation in a LiDAR sample survey in Hedmark county, Norway. *Canadian Journal of Remote Sensing* 41: 96–107.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413–428.
- Säynäjoki, R., Packalén, P., Maltamo, M., Vehmas, M. & Eerikäinen, K. 2008. Detection of aspens using high resolution aerial laser scanning data and digital aerial images. *Sensors* 8: 5038–5055.
- Takeda, H. 2004. Ground surface estimation in dense forest. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 35(B3): 1016–1023.
- Thies, M., Pfeifer, N., Winterhalder, D. & Gorte, B.G.H. 2004. Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 571–581.
- TopoSys, 1996, Digital Elevation Models, Services and Products.
- TopoSys, 1999, Digital Elevation Models, Services and Products.
- Tokola, T. 1988. Satelliittikuvien käyttö koelaotantaan perustuvassa suuralueiden inventoinnissa. Master's thesis, Faculty of Forestry, University of Joensuu, 72 pages.
- Tokola, T. & Heikkilä, J. 1995. Satelliittikuvainventoinnin puuston tilavuusestimaattien luotettavuus tilatasolla. Julkaisussa: Korhonen, K., Mäkkeli, P., (toim.) Metsien eri käyttömuodot yhdistävä suunnittelu. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1995. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 568: 23–35.
- Tokola, T., Kangas, A., Kalliovirta, J., Mäkinen A. & Rasinmäki, J. 2006. Simulointi ja Optimointi uuteen metsäsuunnitteluun. *Metsätieteen Aikakauskirja* 1/2006: 60–65.
- Tokola, T., Letoan, T., Poncet, F., V., Tuominen, S. & Holopainen, M. 2007. Forest Reconnaissance Surveys: Comparison of estimates based on simulated TerraSar, and optical data. *The Photogrammetric Journal of Finland* (20): 64–79.
- Tomppo, E., 1990. Satellite image-based national forest inventory of Finland. *The Photogrammetric Journal of Finland* 12(1): 115–120.
- Tomppo, E., 2006. The Finnish multi-source National Forest Inventory – Small area estimation and map production. Julkaisussa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.) Forest inventory: Methodology and applications. *Managing Forest Ecosystems*, Vol. 10, Springer, Dordrecht, s.195–224.
- Tuominen, S. 2006. Estimation of local forest attributes, utilizing two-phase sampling and auxiliary data. *Dissertationes Forestales* 41.
- Tuominen, S. & Poso, S. 2001. Improving multi-source forest inventory by weighting auxiliary data sources. *Silva Fennica* 35(2): 203–214.

- Tuominen, S., Holopainen, M., Poso, S. 2006. Multiphase sampling. Julkaisussa: Kangas, A. & Maltamo, M. (toim.) *Forest inventory: Methodology and applications. Managing Forest Ecosystems*, Vol. 10, Springer, Dordrecht, s. 235–252.
- Utterä, J., Haara, A., Tokola, T. & Maltamo, M. 1998. Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs. *Forest Ecology and Management* 110(1998): 275–282.
- Vastaranta, M., Ojansuu, R. & Holopainen, M. 2010a. Puustotietojen ajantasaistuksen luotettavuus. *Metsätieteen aikakauskirja*, 4/2010: 367–381.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H. & Viitala, R. 2010b. Determination of stands first thinning maturity using airborne laser scanning. *Silvilaser 2010*, conference proceedings.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H. & Viitala, R. 2011a. Predicting stand-thinning maturity from airborne laser scanning data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26(2): 187–196.
- Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, M., Hovi, A. & Holopainen, M. 2011b. Area-based snow damage classification of forest canopies using bi-temporal lidar data. Julkaisussa: Lichti, D. & Habib, A. 2011. *LaserScanning 2011 proceedings*, pp 5.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J., Mäkinen, A., Rasinmäki, J., Melkas, T., Kaartinen, H. & Hyypä, H. 2011c. Effects of individual tree detection error sources on forest management planning calculations. *Remote Sensing* 3(8): 1614–1626; doi: 10.3390/rs3081614.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Haapanen, R., Yu, X., Melkas, T., Hyypä, H. & Hyypä, J. 2011d. Individual tree detection and area-based approach in retrieval of forest inventory characteristics from low-pulse airborne laser scanning data, *The Photogrammetric Journal of Finland* 22(2)2011: 1–13.
- Vastaranta, M., Korpela, I., Uotila, A., Hovi, A. & Holopainen, M. 2012a. Mapping of snow-damaged trees in bi-temporal airborne LiDAR data. *European Journal of Forest Research* 131: 1217–1228, DOI: 10.1007/s10342-011-0593-2
- Vastaranta, M., Kankare, V., Holopainen, M., Yu, X., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2012b. Combination of individual tree detection and area-based approach in imputation of forest variables using airborne laser data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67: 73–79.
- Vastaranta, M., Kantola, T., Lyytikäinen-Saarenmaa, P., Holopainen, M., Kankare, V., Wulder, M., Hyypä, J. & Hyypä, H. 2013a. Area-based mapping of defoliation of Scots pine stands using airborne scanning LiDAR. *Remote Sensing* 2013, 5(3): 1220–1234. doi: 10.3390/rs5031220.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyypä, J. & Kaasalainen, S. 2013b. TerraSAR-X stereo radargrammetry and airborne scanning LiDAR height 3D metrics in imputation of forest above-ground biomass and stem volume. Accepted for publication in the *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing (TGRS)*.
- Vauhkonen, J. 2010. Estimating single-tree attributes by airborne laser scanning: methods based on computational geometry of the 3-D point data. *Dissertationes Forestales* 104. 44 p. Doctoral thesis.
- Vauhkonen, J., Tokola, T., Maltamo, M. & Packalén, P. 2008. Effects of pulse density on predicting characteristics of individual trees of Scandinavian commercial species using alpha shape metrics based on airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34: 441–459.
- Vauhkonen, J., Tokola, T., Packalén, P. & Maltamo, M. 2009. Identification of Scandinavian commercial species of individual trees from airborne laser scanning data using alpha shape metrics. *Forest Science* 55(1): 37–47.
- Vauhkonen, J., Korpela, I., Maltamo, M. &

- Tokola, T. 2010. Imputation of single-tree attributes using airborne laser scanning-based height, intensity, and alpha shape metrics. *Remote Sensing of Environment* 114: 1263–1276. DOI 10.1016/j.rse.2010.01.016
- Vauhkonen J, Packalen P, Malinen J, Pitkänen J. & Maltamo M. 2013a. Airborne laser scanning based decision support for wood procurement planning. *Scandinavian Journal of Forest Research*, DOI: 10.1080/02827581.2013.813063
- Vauhkonen, J., Hakala, T., Suomalainen, J., Kaasalainen, S., Nevalainen, O., Vastaranta, Holopainen, M. & Hyyppä, J. 2013b. Classification of Spruce and Pine Trees Using Active Hyperspectral LiDAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 2013(99): 1–4.
- Vehmas, M. 2011. Airborne laser scanning based identification and interpretation on ecologically important old-growth forest habitats in natural conservation areas. *Dissertationes Forestales* 120. University of Eastern Finland, School of Forest Sciences.
- Vehmas, M., Eerikäinen, K., Peuhkurinen, J., Packalén, P. & Maltamo, M. 2008. Airborne laser scanning for the identification of boreal forest site types. *Julkaisussa: Hill, R., Rossette, J. & Suárez, J. 2008. Silvilaser 2008 proceedings*, s. 58–65.
- Vehmas, M., Eerikäinen, K., Peuhkurinen, J., Packalén, P., Maltamo, M., 2009. Identification of boreal forest stands with high herbaceous plant diversity using airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management* 257: 46–53.
- Villikka, M., Maltamo, M., Packalén, P., Vehmas, M., & Hyyppä, J. 2007. Alternatives for predicting tree-level stem volume of Norway spruce using airborne laser scanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland* 20(2): 33–42.
- Vosselman, G. & Maas, H.-G. 2001, Adjustment and filtering of raw laser altimetry data. *Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models*, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. Paper 5, 11 s.
- Wagner, W. 2010. Radiometric calibration of small-footprint full-waveform airborne laser scanner measurements: Basic physical concepts. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(6): 505–513.
- Wagner, W., Ullrich, A., Ducic, V., Melzer, T. & Studnicka, N. 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 60: 100–112.
- Wang, G., Poso, S., Waite, M. L., 1997. *SMI User's Guide for Forest Inventory and Monitoring*. University of Helsinki, Department of forest resource management. Publications 16. 336 p. ISBN 951-45-7841-4.
- Watt, P. J. & Donoghue D. N. M. 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 26(7): 1437–1446.
- Wehr, A., & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54(2–3): 68–82.
- Wulder, M., Niemann, K.O., & Goodenough, D. 2000. Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment* 73: 103–114.
- Wulder, M.A., J.C. White, R.F. Nelson, E. Næsset, H.O. Ørka, N.C. Coops, T. Hilker, C.W. Bater & Gobakken, T. 2012. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment* 121(2012): 196–209.
- Yu, X., Hyyppä, J., Kaartinen, H. & Maltamo, M. 2004a. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* Vol. 90: 451–462.

- Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H. & Maltamo, M. 2004b. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. International Conference NATSCAN 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications', 3–6, Oct. 2004, Freiburg, Germany, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI(8/W2): 96–101.
- Yu, X., Hyypä, J., Kukko, A., Maltamo, M. & Kaartinen, H. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanning data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72(12): 1339–1348.
- Yu, X., Hyypä, J., Kaartinen, H., Maltamo, M. & Hyypä, H. 2008. Obtaining plotwise mean height and volume growth in boreal forests using multi-temporal laser surveys and various change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1367–1386.
- Yu, X., Hyypä, J., Holopainen, M. & Vastaranta, M. 2010. Comparison of Area-Based and Individual Tree-Based Methods for Predicting Plot-Level Forest Attributes. *Remote Sensing* 2(6): 1481–1495.
- Yu, X., Liang, X., Hyypä, J., Kankare, V., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2013. Stem biomass estimation based on stem reconstruction from terrestrial laser scanning point clouds. *Remote Sensing Letters* 4(4): 344–353.
- Yu, X., Hyypä, J., Vastaranta, M. & Holopainen, M. 2011. Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on random forest technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66: 28–37.
- Ziegler, M., Konrad, H., Hofrichter, J., Wimmer, A., Ruppert, G., Schardt, M., & Hyypä, J. 2000. Assessment of forest attributes and single-tree segmentation by means of laser scanning. *Laser Radar Technology and Applications V*, 4035: 73–84.

